



变压器试验技术大全

主编 贺以燕 杨治业



辽宁科学技术出版社
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

责任编辑：枫 岚 素 馨
封面设计：留藏设计工作室



ISBN 7-5381-4680-6



9 787538 146806 >

ISBN 7-5381-4680-6

定价：78.00元

TM406

2

变压器试验技术大全

贺以燕 杨治业 主编

辽宁科学技术出版社

·沈阳·

图书在版编目(CIP)数据

变压器试验技术大全/贺以燕,杨治业主编. —沈阳:辽宁科学技术出版社,2006.6

(变压器技术丛书)

ISBN 7-5381-4680-6

I. 变… II. ①贺…②杨… III. 变压器—试验 IV. TM406

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 009229 号

出版发行:辽宁科学技术出版社

(地址:沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编:110003)

印刷者:辽宁出版集团新华印刷厂

发行者:各地新华书店

幅面尺寸:184mm×260mm

印 张:32.75

字 数:850 千字

插 页:4

印 数:1~5000

出版时间:2006 年 6 月第 1 版

印刷时间:2006 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑:枫 岚 素 馨

封面设计:留藏设计工作室

版式设计:于 浪

责任校对:东 戈

定 价:78.00 元

内 容 提 要

本书介绍了变压器试验的基础知识、变压器的绕组电阻测量、电压比测量、联结组标号试验、绝缘电阻和介质损耗因数测量、空载电流和空载损耗测量、短路阻抗和负载损耗测量、外施耐压试验、感应耐压试验、外绝缘试验和检测、局部放电试验、雷电冲击试验、操作冲击试验、变压器油试验、温升试验、零序阻抗测量、短路承受能力试验、声级测定、空载电流谐波测量、无线电干扰测量、电力变压器冲击测量及绕组传递过电压试验、长期空载与油流带电试验、干式变压器的气候环境和燃烧性能试验、大型变压器的现场验收试验、分接开关试验、冷却器试验、变压器组件试验、高压直流换流变压器试验、电抗器试验、变压器油色谱分析检测和故障判断、测量系统和仪器的校准、间接测量的误差分析等。最后还对高压试验设备和试验用发电机的选择和计算做了介绍。

本书是变压器设计、试验、运行和检修人员的不可缺少的工具书,也可作为高等院校相关专业师生的参考资料。

序 言

我国变压器产量已经超过 500GVA/年,且逐年上升,已经占世界总产量的 1/2 以上,居世界第一位。由于从事变压器技术工作的人员越来越多,因此,对技术书籍的需求量也越来越大,要求也越来越高。尤其是 20 世纪 90 年代以来,我国电力工业和变压器制造技术都取得了突飞猛进的发展;IEC 和 GB 等标准也在此期间作了较大的修改;检测设备和测量仪器有了较大的改进和更新;变压器试验技术水平也有了很大提高。为满足广大从事试验工作的技术人员和工人的迫切需要,为进一步总结、交流变压器试验方面的技术和经验,沈阳变压器研究所组织变压器行业和电力行业的有关专家编写了《变压器试验技术大全》一书。本书详细介绍了 GB 和 IEC 最新标准及当前国内外变压器试验和运行等方面的最新试验技术,并在编写过程中力求做到既有理论分析又有实际操作。本书可供变压器设计、制造、试验、运行和检修等部门的有关技术人员和工人阅读,也可以供高等院校相关专业的师生参考。

全书正文 32 章、附录 6 篇。第 1、16、27 章、附录 A 和附录 D 由贺以燕教授级高级工程师编写;第 2、9、26 章和附录 E 由王景吾高级工程师编写;第 3、28 章和附录 B 由范履苞高级工程师编写;第 4 章由王景吾高级工程师、王正官高级工程师编写;第 5 章由杨治业教授级高级工程师、范履苞高级工程师编写;第 6、7、11 和 29 章由杨治业教授级高级工程师编写;第 8 和 10 章由潘炳宇教授级高级工程师编写;第 12 和 13 章由陈道辉教授级高级工程师编写;第 14 章由张文相教授级高级工程师编写;第 15 章由王正官高级工程师编写;第 17、23 章由贺以燕教授级高级工程师、杨治业教授级高级工程师编写;第 18 章由王敬高级工程师、杨治业教授级高级工程师编写;第 19 章由李世成高级工程师编写;第 20 章由姜家伟高级工程师、曲岩高级工程师编写;第 21 章由胡运英高级工程师编写;第 22、31 章由孙继伟高级工程师编写;第 24 章和附录 C 由胡惠然教授级高级工程师编写;第 25 章由张德明教授级高级工程师编写;第 30 章由钟洪璧高级工程师编写;第 32 章由孙继伟高级工程师、周绍珠工程师编写、附录 F 由朱建新高级工程师编写。全书由贺以燕教授级高级工程师、杨治业教授级高级工程师主编。

本书与以前的试验书籍相比较,相同试验项目的内容更丰富、更符合最新标准要求,同时还增加了很多前所未有的内容,如“电力变压器冲击测量及绕组传递过电压试验”、“干式变压器的气候、环境和燃烧性能试验”、“高压直流换流变压器试验”、“变压器组件试验”、“大型变压器的现场验收试验”、“测量系统和仪器的校准”、“测量系统误差及测量不确定度”、“变压器油色谱分析检测和故障判断”、“外绝缘试验及检测”、“电抗器试验”10 章正文和 6 篇附录共 16 个专题内容。

沈阳变压器研究所领导对本书的编写出版非常重视和支持。原沈阳变压器有限责任公司和国家变压器质量监督检验中心的有关技术人员为本书提供了大量的试验数据。《变压器》杂志编辑部原主编应百川高级工程师对本书的出版给予了许多帮助;编辑周永明高级工程师对本书进行了编辑和校对;郑颖同志对本书进行了打字和排版;还有许多同志也对本书的编写给予了大力协助。在此,仅对他们表示由衷地感谢!

由于我们的水平所限,书中的不妥、错误和不足之处在所难免,恳请广大读者予以批评指正。

编 者

2005 年 10 月

目 录

第一章 总论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 试验基础知识	(1)
第二章 绕组电阻测量	(6)
第一节 概述	(6)
第二节 测量方法	(6)
第三节 快速测量直流电阻的方法	(9)
第三章 电压比测量	(17)
第一节 概述	(17)
第二节 电压测量法	(17)
第三节 标准变压器式电桥测量法	(18)
第四节 电阻分压式电压比电桥	(19)
第五节 电压比测量的自动化	(20)
第四章 联结组标号试验	(24)
第一节 概述	(24)
第二节 直流法	(25)
第三节 交流法	(26)
第五章 绝缘电阻和介质损耗因数测量	(31)
第一节 概述	(31)
第二节 试验标准及规定	(31)
第三节 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验	(32)
第四节 自动绝缘测试仪	(35)
第五节 介质损耗因数($\tan\delta$)试验	(36)
第六章 空载电流和空载损耗测量	(40)
第一节 概述	(40)
第二节 空载试验方法	(40)
第三节 额定条件下的空载试验	(42)
第四节 非额定条件下的空载试验	(45)
第五节 绝缘装配前铁心的空载试验	(47)
第六节 空载损耗、空载电流增大的原因分析	(48)
第七章 短路阻抗和负载损耗测量	(49)
第一节 概述	(49)
第二节 试验方法	(49)
第三节 额定条件下的三相负载试验	(50)
第四节 非额定条件下的短路阻抗和负载损耗测量	(52)
第五节 短路阻抗和负载损耗的影响因素分析	(55)

第八章 外施耐压试验	(56)
第一节 概述	(56)
第二节 试品及试品的电容值和试验电压值	(56)
第三节 试验设备	(57)
第四节 试验及试验结果	(71)
第九章 感应耐压试验	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 典型的感应试验接线图	(75)
第三节 试验电源	(81)
第四节 感应试验容量的估算	(84)
第五节 试验频率的选择	(87)
第六节 同步发电机的自激磁	(88)
第七节 防止电压谐振发生的方法	(90)
第八节 补偿	(91)
第九节 三相发电机运行不平衡的解决办法	(93)
第十章 外绝缘试验及检测	(96)
第一节 概述	(96)
第二节 放电电压的随机性	(96)
第三节 外绝缘的试验方法	(98)
第四节 试验条件	(101)
第五节 变压器外绝缘的检测	(110)
第十一章 局部放电试验	(113)
第一节 概述	(113)
第二节 绝缘内部的气隙放电	(114)
第三节 产生局部放电的其他原因	(116)
第四节 局部放电试验的基本测试回路	(116)
第五节 油浸电力变压器的局部放电试验	(118)
第六节 干式电力变压器的局部放电试验	(124)
第七节 局部放电试验中的干扰问题	(128)
第十二章 雷电冲击试验	(132)
第一节 概述	(132)
第二节 冲击电压发生器	(132)
第三节 截断装置	(148)
第四节 冲击电压测量	(150)
第五节 雷电冲击试验	(157)
第六节 雷电冲击试验故障检测	(160)
第十三章 操作冲击电压试验	(175)
第一节 概述	(175)
第二节 操作冲击电压的波形及产生	(175)
第三节 操作冲击电压波形的计算	(176)

第四节	变压器操作冲击试验	(186)
第十四章	变压器油试验	(190)
第一节	概述	(190)
第二节	油试样采集	(190)
第三节	击穿电压试验	(191)
第四节	介质损耗因数测量	(192)
第五节	含水量测定	(193)
第六节	外观检验	(194)
第七节	密度测定	(194)
第八节	运动黏度测定	(194)
第九节	闪点(闭口杯法)测定	(195)
第十节	凝点、倾点测定	(196)
第十一节	界面张力测定	(196)
第十二节	酸值测定	(197)
第十三节	氧化安定性测定	(198)
第十四节	油中溶解气体分析	(199)
第十五节	与固体材料相容性试验	(202)
第十五章	温升试验	(204)
第一节	概述	(204)
第二节	连续额定容量下的稳态温升限值	(204)
第三节	特殊使用条件下对温升限值的修正要求	(205)
第四节	油浸变压器的温升试验方法	(206)
第五节	干式变压器的温升试验方法	(215)
第六节	特殊变压器的温升试验方法	(220)
第十六章	零序阻抗测量	(222)
第一节	概述	(222)
第二节	零序阻抗的测量方法	(222)
第三节	零序阻抗的计算方法	(224)
第四节	零序阻抗测量实例	(227)
第五节	小结	(227)
第十七章	短路承受能力试验	(228)
第一节	概述	(228)
第二节	试验标准及要求	(228)
第三节	试验方法	(229)
第四节	试验实例	(235)
第十八章	声级测定	(239)
第一节	概述	(239)
第二节	与变压器噪声有关的声学基本参量	(239)
第三节	变压器的空载声级测量(声压法)	(241)
第四节	变压器的负载声级测量(声压法)	(250)

第五节	声强测量简介	(251)
第十九章	空载电流谐波测量	(252)
第一节	概述	(252)
第二节	变压器空载电流谐波产生机理	(252)
第三节	空载电流谐波的测量原理和测量仪器	(253)
第四节	空载电流谐波测量实例	(254)
第二十章	无线电干扰测量	(256)
第一节	概述	(256)
第二节	试验条件	(256)
第三节	测试回路	(257)
第四节	试验方法	(258)
第五节	试验报告	(259)
第二十一章	电力变压器冲击测量及绕组传递过电压试验	(261)
第一节	概述	(261)
第二节	冲击测量与冲击试验的差异	(261)
第三节	冲击测量的仪器	(261)
第四节	冲击测量内容	(263)
第五节	冲击测量方法	(264)
第六节	测量结果分析	(265)
第七节	从高压绕组向低压绕组传递的过电压	(266)
第八节	冲击测量实例	(266)
第二十二章	长期空载与油流带电试验	(270)
第一节	概述	(270)
第二节	油流带电的机理及其危害	(270)
第三节	油流静电电流的测试原理和常用的几种方法	(271)
第四节	油流静电电流测量的典型数据	(274)
第二十三章	干式变压器的气候、环境和燃烧性能试验	(278)
第一节	概述	(278)
第二节	试验标准及有关规定	(278)
第三节	试验内容	(278)
第四节	试验实例	(281)
第二十四章	大型变压器的现场验收试验	(286)
第一节	概述	(286)
第二节	现场安装中的试验	(286)
第三节	现场安装竣工后的试验	(288)
第二十五章	分接开关试验	(292)
第一节	概述	(292)
第二节	技术要求	(294)
第三节	试验项目及方法	(301)
第二十六章	冷却器试验	(342)

第一节	概述	(342)
第二节	技术要求和参数	(343)
第三节	强油风冷却器试验	(344)
第四节	强油水冷却器试验	(348)
第五节	与试验有关事项	(349)
第六节	实例	(350)
第七节	油流继电器的原理及试验	(351)
第八节	控制箱在冷却器试验中的动作功能试验	(352)
第九节	风扇电动机和油泵电动机汲取功率测量	(353)
第二十七章	变压器组件试验	(355)
第一节	概述	(355)
第二节	套管试验	(355)
第三节	气体继电器试验	(360)
第四节	压力释放阀试验	(361)
第五节	速动油压继电器试验	(362)
第二十八章	测量系统和仪器的校准	(364)
第一节	概述	(364)
第二节	交流高电压测量系统的校准	(364)
第三节	冲击试验用数字记录仪的性能要求和校准	(366)
第四节	雷电冲击高电压测量系统校准	(370)
第五节	局部放电测量系统和校准器的校准	(372)
第二十九章	测量系统误差及测量不确定度	(378)
第一节	概述	(378)
第二节	间接测量的误差分析	(379)
第三节	工频电压测量系统的误差分析	(381)
第四节	空载损耗测量系统的误差计算	(385)
第五节	负载损耗测量系统的误差计算	(388)
第六节	测量不确定度	(390)
第三十章	变压器油色谱分析检测和故障的判断	(396)
第一节	概述	(396)
第二节	变压器油中溶解气体的来源	(396)
第三节	变压器内部故障的类型及其油中气体的特征	(397)
第四节	变压器内部故障的具体判断和分析	(400)
第五节	对变压器油中 CO 、 CO_2 的判断	(403)
第六节	一些不同类型故障实例和故障点查找	(404)
第三十一章	高压直流换流变压器试验	(423)
第一节	概述	(423)
第二节	换流变压器的工作原理和结构特点	(423)
第三节	换流变压器的试验项目及绝缘试验电压	(424)
第四节	换流变压器的试验原理和试验方法	(425)

第三十二章 电抗器试验	(431)
第一节 概述	(431)
第二节 并联电抗器试验	(431)
第三节 平波电抗器试验	(437)
附录 A STL 导则:高压测量系统与国家测量标准的比对校正	(442)
附录 B 测量系统测量不确定度的分析和评定	(449)
附录 C 电力变压器的保护和故障录波装置	(462)
附录 D 高压试验设备	(466)
附录 E 试验用发电机的选择与计算	(497)
附录 F 采用频响法对变压器绕组变形故障的测量分析与判断	(507)

第一章 总 论

第一节 概 述

进行变压器试验的目的是取得其性能数据,用来判定变压器合格与否,并提供给用户使用。由于设计变压器时,必须遵循有关标准和技术要求,因此,试验结果应与之相关。不同的标准和技术要求有不同的试验方法和结果。因此,必须首先研究标准,其次才能讨论各个项目及其试验。

1885年匈牙利拉提、德利和齐佩诺夫斯基发明了变压器,在以后的一个多世纪里,变压器工业有了长足的发展。由于变压器可变换交流电压,这使发电机的电压经变压器可以升高或降低。电源的电压愈高,传输距离愈长。当电压达到百万伏级,电能可传输到1 000km以外。在终端,变压器可将电压降到400V,给广大用户使用。这样就构成了以变压器为主导的整个发、变、输、供电行业。

在当今世界,电能已成为国民经济、人民生活不可缺少的一部分。尽管输变电工业只占国民生产总值的1%,但是其重要性已远远超过1%,毫不夸张地说电可主宰国民经济。因此各国对输变电行业都非常重视。

解放前,我国变压器行业发展十分缓慢,从1922年制造第一台15kVA变压器起,到1949年仅能生产2 000kVA/33kV变压器。1949年全国装机容量为185kW,发电量为43亿kW·h。解放后,我国不仅建成了国内最大的沈阳变压器厂、西安变压器厂、保定变压器厂三个生产厂,还建成了数十家中型骨干厂以及数百家配电变压器生产厂。在半个多世纪里,特别是改革开放后20多年里我国变压器行业有了飞跃的发展。到2004年底全国装机容量达到了44 070万kW,发电量达到21 870亿kW·h。目前,单台变压器容量最高达到840MVA,电压等级达到750kV,预计到2015年左右可能出现1 000kV变压器和1 000kV电力系统。

目前我国的变压器试验技术已有了显著变化,已由传统的指针式仪表发展到数字式仪表,由手工操作控制逐步向自动化方向发展。各种新方法、新仪器得到广泛的应用,这使试验结果比过去更准确、可靠和可信。

第二节 试验基础知识

1 试验标准

本章所讲的试验技术,是对工厂正常生产的整台变压器的试验而言。对工序质量控制方面的试验,例如铁心半成品空载试验,绕组半成品电阻测量,不单独述及。而各工厂对半成品试验项目有各自不同的规定及判断标准,也就难以一概而论了。

对某些修理品或为事故分析做的一部分试验,由于试验项目不全,这里没有涉及,可参照工厂有关成品试验。

变压器从订货到设计都要遵循一定的标准或技术条件,产品必须与之相符合,而产品也必须按有关标准或技术条件进行试验,产品是否合格,要依标准或技术条件来判断。

IEC60076-1~60076-5《电力变压器》、IEC726《干式电力变压器》是国际电工委员会起草的国际标准,标准规定了电力变压器的主要方面,列有主要试验项目和试验方法,有的项目还给出了合格与否的判断标准。IEC标准是国际通用的。欧洲国家如英国、德国都等同采用。对我国出口的变压

器,多数用户要求执行IEC标准。但IEC标准缺少性能参数的要求,如 P_0 、 P_k 数值。一些参数,只能在订货技术条件中注明。

我国GB1094.1~1094.2—1996电力变压器的国家标准等效采用IEC60076-1~60076-2—1993标准。GB1094.3、GB1094.5—2003电力变压器标准等效采用IEC60076-3、60076-5:2000标准。GB6450—1986《干式电力变压器》等效采用IEC726(1982)标准。我国还有GB/T6451—1999《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》标准等。我国生产的油浸式与干式变压器必须执行国家标准,试验合格与否用国家标准及相应的订货技术条件判断。

对于出口的变压器,大多数要执行IEC标准,但有的国外厂商要求执行某一国家标准,例如,要求执行日本的JIS、美国的ANSI标准,则变压器试验项目、方法均应按该标准,合格与否的判断也必须按该标准判断。

标准是“法”,试验技术则是一种“方法与手段”。试验的根本目的就是要判断产品是否合“法”。“合法”则合格,可以放行,可以投运;不合“法”则是不合格,要返工修理达到合格,否则就要报废。国内使用的产品都要执行国家标准。本书所述是按国标所做的试验。

2 试验分类

一台产品的试验,是工厂对产品所做的最终试验检查。为确保变压器的电气和机械性能完好无缺和以后可靠地长期运行,这些试验的严格性、彻底性以及所具有的权威性是至关重要的。变压器实测值与标准规定值的允许偏差见表1-1。

表 1-1 偏差

	项 目			偏 差
1	a. 总损耗 b. 空载损耗或负载损耗			+10% +15%但总损耗不得超过+10%
2	空载电压比	规定的第一对绕组	主分接	a.规定电压比的 $\pm 0.5\%$ b.实际阻抗百分数的 $\pm 1/10$ } 取其中低者
			其他分接	按协议,但不低于 a 和 b 中较小者
		其他绕组对		按协议,但不低于 a 和 b 中较小者
3	短路阻抗	有两个独立绕组的变压器,或多绕组变压器中规定的第一对独立绕组	主分接	当阻抗值 $\geq 10\%$ 时, $\pm 7.5\%$ 当阻抗值 $< 10\%$ 时, $\pm 10\%$
			其他分接	当阻抗值 $\geq 10\%$ 时, $\pm 10\%$ 当阻抗值 $< 10\%$ 时, $\pm 15\%$
		自耦联结的一对绕组,或多绕组变压器中规定的第二对独立绕组	主分接	$\pm 10\%$
			其他分接	$\pm 15\%$
		其他绕组对		$\pm 15\%$ 按协议正偏差可加大
4	空载电流			+30%

注:1. 对某些自耦变压器和增压变压器,因其阻抗很小,则应有更大的偏差。对分接范围大的变压器,特别是在其分接范围不对称时,也会要求作特别考虑。另一方面,例如当变压器要和已有的变压器并联时,按协议,可规定更小的阻抗偏差,但应在投标阶段提出,制造厂和用户协商规定。

2. 规定值,是指制造厂规定的(设计值或标准值)。

3. 高压绕组与其相近的绕组称为第一对绕组。

表1-1多绕组变压器的损耗偏差适用于每一对绕组,但对某一负载条件给定时除外。

凡试验项目无限值者,均要提供试验值作分析用。

从保证质量及经济性出发,IEC及各国在总结多年实践经验的基础上,将产品的试验分为三类。本书按我国标准分类。

2.1 例行试验

所有变压器都必须接受的试验称为例行试验,也称出厂试验。它对检验与控制每一台变压器质量至关重要,其试验项目包括:

- (1)绕组电阻测量;
- (2)电压比测量和联结组标号检定;
- (3)短路阻抗和负载损耗的测量;
- (4)空载电流和空载损耗的测量;
- (5)绕组对地绝缘电阻和(或)绝缘系统电容的介质损耗因数($\tan\delta$)测量;
(注:此试验值用来与安装现场作比较,故不给出限值)
- (6)外施耐压试验;
- (7)感应耐压试验;
- (8)局部放电测量(按GB1094.3—2003标准规定110kV为短时;220kV及以上为长时);
- (9)雷电冲击全波试验(按GB1094.3—2003标准规定为110kV及以上);
- (10)操作冲击试验(按GB1094.3—2003标准为220kV及以上,但当规定了ACSD试验时,则220kV不要求SI试验);
- (11)有载分接开关试验(对有载调压变压器);
- (12)变压器油试验。

2.2 型式试验

型式试验是在有代表性的变压器产品上进行的试验,用以验证变压器是否满足标准所规定的要求,从而证明同类产品或同系列产品是否达到了标准的要求,这些要求是例行试验所不包括的,型式试验项目如下:

- (1)温升试验;
- (2)雷电冲击试验(110kV以下全波、截波;110kV及以上截波;中性点全波,但对于全绝缘变压器当中性点不引出时为特殊试验)。

2.3 特殊试验

特殊试验不同于例行试验和型式试验,是制造厂和用户通过协商而决定做的试验,有的只要求提供一个测量数据,而不规定判断标准,有的因特别困难,需花费巨大人力财力,只好作为特殊试验项目,特殊试验项目如下:

- (1)暂态电压传输特性测定;
- (2)三相变压器零序阻抗测量;
- (3)短路试验;
- (4)声级测量;
- (5)空载电流谐波测量;
- (6)风扇和油泵电机吸取功率的测量。

按GB1094.3—2003标准,变压器不同绕组的绝缘试验要求见表1-2。

3 试验方案

除了零星试验和日常多次做过的试验之外,新产品和系统的试验都要作试验方案,在方案内应依次列入试验项目、线路图、应加电压和电流或其他参数值、记录表格(一般均有标准化的表格)、注意事项、人员分工以及安全事项等。

对试验方案一定要重视,决不能马虎。由于方案错误或不当致使整个试验出错,造成试验返工,

表1-2 对不同种类绕组的要求

绕组类型	设备最高电压 U_m /kV (方均根值)	试 验						
		雷电冲击			操作冲击 (SI)	长时 AC (ACLD)	短时 AC (ACSD)	外施 AC
		线端全波 (LI)	线端截波 (LIC)	中性点全波 (LI)				
全绝缘	$U_m \leq 72.5$	型式	型式	型式 ^①	不适用	不适用	例行	例行
全绝缘和分级绝缘	$72.5 < U_m \leq 170$	例行	型式	型式 ^②	不适用	特殊	例行	例行
分级绝缘	$170 < U_m < 300$	例行	型式	型式	例行 ^①	例行	特殊 ^①	例行
	$U_m \geq 300$	例行	型式	型式	例行	例行	特殊	例行

① 如果规定了 ACSD 试验,则不要求 SI 试验,这应在询价定货时说明。

② 对全绝缘的三相变压器,当中性点不引出时,中性点的雷电全冲击试验为特殊试验。

甚至试品损坏的例子不胜枚举。

应该记住:一项成功的试验与一项合理的试验方案有密切的因果关系,不能掉以轻心。

4 试验规章与管理

好的试验室(站)都有一套行之有效的管理规章制度,形成文字,全体人员遵循。

书面的规章是必须有的,不但要有,而且要定期学习,要检查执行的情况,还要不断地将新鲜经验加进去,将过时的东西淘汰掉。

规章制度是因试验室(站)而异,应结合自己的实际情况建立。试验人员应加强思想认识,不应走形式,在试验中严格贯彻执行规章制度。规章的核心是负责制,负责人要把责任负起来,这是试验成败的关键。

管理包括设备、仪器管理。对大型试验设备,如工频试验装置、冲击发生器、大电流电源设备、发电机等,要按设备系统制定运行与维护规程,还要定期检修调整。规程要求文字简单明了,各种曲线完备;维护方法适当;定期检查内容、时间明确;整定项目、记录项目齐备;仪器仪表要编号明确,定期校验,要有专门存放的房间和柜子,易于查找,归还方便,失效的与常用的要分开放置,防止用错。

每套大型设备应设专人负责,仪器、仪表要有专人管理。

对大型设备要建立档案,记录设备故障情况、检查情况,元部件更换情况(防止人员更换后情况查不清,误事),要保持设备经常好用,防止试验设备处于故障状况或带病运行。如果试验设备有问题,这不但影响被试品,也易发生事故。

5 试验组织与分工

绝大多数变压器试验是大型试验,要加高电压、大电流,因此不是一个人能单独完成的,一般要3~5人。这就需要合理安排,做好协调分工,要分内外线,协同工作以相互照应。对缺乏自动记录打印的试验项目,要做好手工记录,否则试验的正确性会受到影响。

6 安全

在整个试验过程中安全最重要。试验室(站)要有一个好的安全规程,并贯彻始终。各种试品、试验设备、仪器的损坏,乃至人员的伤亡,无不与缺少安全规程、不能贯彻安全规程和违章作业有关。一些引起物品的损坏、人员伤亡事故等血的教训,都是应该汲取的。

安全的核心是安全意识,人员的警惕性最为关键。操作人员对自己负责,对其他工作人员负责,监护人员对被监护者负责,这样才有利于避免事故发生。不要重复电源未切而上变压器改接线,监护人员不坚守工作岗位导致操作人员改接线的触电事故。

试验技术不断发展变化,日新月异,但安全这条线不能变。所有试验人员都必须不断提高自己

的安全素质,养成良好的安全习惯,并监督帮助在一起工作的试验人员,做好安全工作,在试验中不出人身伤害事故是最重要的。

声、光、电等指示信号系统应该完备,消防设备要良好齐全。

试验室(站)要根据自己的情况,编写安全规程,在实施的过程中,定期学习,修改补充完善。杜绝事故的发生是试验室(站)的首要工作任务,是变压器试验技术中最重要的一项。

7 记录、报告与档案

试验记录要有专人填写,例行试验应有预先规划好的统一表格,填写要认真,字迹不得潦草,防止记错、认错,记录不得涂改,如记错需要改正时,在删除后于改正处要加盖试验人员名章(或代号章),防止日后混乱不清。

报告是试验的最终表达形式,是供用户、鉴定人员、领导及各级政府官员审阅的正式文件,一般均有统一格式,要打印成文,其上面的文字要清楚,数字要正确,各种波形图、照片要清晰,结论要明确,并要经过试验、校核、审查和审定人员签字认可,杜绝报告疑窦丛生、模棱两可。总之,要防止各种不合格的报告出笼(非指试品不合格)。过去的实践中曾看到过多起不合要求的报告在各种会议上出现,这是不应该发生的事,试验人员有责任写出合乎要求的报告,而不能在这最后阶段疏忽大意。

档案是指试验记录和报告的存档,产品特别是重大产品记录和报告,要精心归档,以便日后查阅。数年之后因产品发生事故要查原始记录与报告,以便分析事故,或者是科研工作的需要查以往的数据,也要查原始记录和报告。

笔者在20世纪90年代曾到法国Sens参观一个铁塔试验站,该站的工程师告知:“凡在该站做过的试验,其记录要保存10年,用过的仪表在记录上作了编号,也要保存10年(不用的也要保存),原因在于以后发生疑问,送试方的铁塔在运行中倒塌,送试方吃官司时,要受试方出证,不但要有文字方面的证明,还要有仪表等证明,以便法庭判断。”这样的档案工作,大出笔者所料,但听解释也有道理,可见国外对记录、报告和档案的重视程度,我们要参考借鉴。

试验技术的发展与试验室(站)的管理息息相关,好的管理可以促进试验技术的发展,因此我们试验人员要十分关心试验管理,切不可认为只有试验技术才是硬功夫、试验管理是无所谓的小事,要促进技术与管理的共同发展。

8 试验技术的发展

近20年来,变压器试验技术有了很大的发展,其最主要的特点是测试自动化程度大为提高,测试仪器更加先进、准确。过去很多手工操作、记录现在均变为自动操作、打印,人员只需设完程序,试验自动完成,报告自动打印好,试验变得简单,而可靠性、可信性却大为提高。

尽管我国各试验室(站)自动化的程度与国外还有一定的差距,可喜的是已经起步,微机技术已开始引入,展望不久的将来,我国的变压器试验技术水平,将与国外越来越接近,最终会达到同一水平。

以上所述,虽是老生常谈,但在探讨各个具体项目试验技术之前,作为试验管理上的内容是至关重要,它是涉及到试验技术发展、成败的关键,重要的是身体力行,认真对待。只有从行动上去执行上述要求,才能将试验做得更好。尤其是试验室(站)的领导人员,以身作则,作好这方面的工作,乃是其头等大事,绝不可掉以轻心。

第二章 绕组电阻测量

第一节 概 述

变压器绕组直流电阻测量是常规试验中不可缺少的项目。不论在生产过程中或在事故分析现场都必须做这项试验,因为它既简便又很重要,所以它是确保变压器生产质量、检修质量和安全运行的一个重要手段。

通过测量直流电阻,可以检验绕组的材质、焊接质量和开关接触状况。例如变压器绕组采用不同厂家的导线就容易使电阻值不平衡。110kV级及以上大型变压器高压绕组大多采用纠结式绕组,焊点很多,一般都是碰焊,特别是铝导线碰焊容易出问题。有的大型变压器低压绕组的铝导线用铜铝接头,焊接工艺要求高。中型变压器低压绕组(0.4kV级)并联根数多,若有一根假焊就会造成电阻值不平衡。因此焊接质量至关重要。开关接触不良,常见的是弹簧淬火不好,致使弹性差。此外,器身完工后,引线刷漆不当,清漆滴在开关动静触头间形成薄漆膜等。这些致使开关每转动一次,电阻数就有变化。其他接触不良,如引线与开关的紧固不好,都会引起电阻增大。

通过测量直流电阻,就能发现上述隐患。每台产品一般要测试两次绕组电阻,器身和成品各一次。这使测量的工作量较大,花费时间也较长。

另一方面,绕组直流电阻是变压器性能试验中的必要参数。例如315kVA以下小型变压器,由于其电阻的成分较大,阻抗三角形受到温度的影响不可忽视,短路阻抗从常温校正到参考温度的数值要由负载损耗或直流电阻来换算。10 000kVA以上大型变压器,由于其杂散损耗占负载损耗的比重大,而且它与温度成反比,因此需要用绕组电阻上的损耗来对换算到参考温度下的负载损耗进行校正。

在温升试验中,用电阻法来测量绕组冷态下和温升试验终了时热状态下的电阻值来计算绕组的平均温度。

对绕组电阻的测量要求是很严格的,按GB/T6451—1999、GB/T16274—1996 国家标准规定,直流电阻不平衡率见表2-1。

直流电阻的测量误差越小越好,特别是温升试验中,直流电阻的测量误差最好不超过 $\pm 0.2\%$ 。基于这种情况,确定测量方法,选择适当的测量设备,是保证测量准确度的关键。

第二节 测量方法

传统的电阻测量是采用直流压降法和直流电阻电桥法。这需要根据被试产品的电阻值来选择试验方法。

1 直流压降法

这种方法是最原始的,也是最简便的方法。它是根据欧姆定律 $R=U/I$,只要测量出电路中的电

表2-1 变压器绕组直流电阻不平衡率

电压等级/kV	容量/kVA	相不平衡率	线不平衡率
6, 10 35 63	1 600 以下	4%	2%
6, 10 35 63	2 000~6 300 2 000~31 500 2 000~63 000	2%(有中点)	1%(无中点)
110 220	120 000 及以下 360 000 及以下	2%(有中点)	1%(无中点)
330	360 000 及以下	2%(有中点)	1%(Δ 接)
500	720 000 及以下	2%(有中点)	2%(Δ 接)

流 I 和负载两端的电压降,就可以计算出电阻 R 。关键是电流表及电压表要具有足够的精度,才能保证电阻的测量精度。

按图2-1接线时,考虑到电压表电阻 r_v 的分路电流 I_v ,若仍以 $R=U/I$ 计算,则变压器绕组电阻:

$$R' = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - (U/r_v)} \quad (2-1)$$

测量误差 $\alpha = (R/r_v) \times 100\%$ 。这时 r_v 愈大, R 愈小,误差就愈小。所以此种接线适用于测量小电阻。

按图2-2接线时,考虑到电流表 r_A 上的电压降,若仍以 $R=U/I$ 计算,变压器绕组电阻:

$$R'' = \frac{U - I r_A}{I} \quad (2-2)$$

其误差 $\alpha = (r_A/R) \times 100\%$ 。这时 R 愈大,误差愈小,所以此种接线适用测量大电阻。

对于具有大电阻、大电感的变压器,如试验变压器YDJ-500,因为测量时间太长,消耗功率大,准确性差,一般不宜用压降法。

由于变压器绕组有电感存在,所以测量时必须注意电压表的安全,施加电流稳定后,才能接入电压,再读数,特别是断开电源前,一定先断开电压表,以免反电势损坏电压表。

由于压降法准确度不高,灵敏度低,需要换算和消耗电能多等原因,一般很少采用,大多采用电桥法。但是对需通大电流如20A以上的电阻测量,配置数显电流表和电压表用压降法还是很满意的。目前国内外采用压降法进行自动测量、微机处理换算、数显和打字,做成套测试设备供快速测量电阻,也是发展方向。

2 电桥法

测量电阻的电桥有两种,一是单臂电桥(惠司登电桥),二是双臂电桥(凯尔文电桥)。

2.1 单臂电桥

单臂电桥原理图见图2-3。

当 K_1 、 K_2 接通后,调节 R 、 R_1 、 R_2 ,使检流计指零, $I_g=0$,电桥平衡,C点和D点电位相等。于是 $I_1 R_x = I_2 R$, $I_1 = I_3$, $I_3 R_1 = I_4 R_2$, $I_2 = I_4$ 。则得:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R \quad (2-3)$$

式中 R_1/R_2 ——电桥的量程倍率,也叫比率臂,一般做成0.01, 0.1, 1, 10, 100。

根据 R_x 的范围,选择好 R_1/R_2 的量程倍率,调节 R 就可以求得 R_x 。单臂电桥通常测大于 10Ω 的电阻。

单臂电桥的缺点是 R_x 包括测量导线的电阻和A、C两点接线的接触电阻,因此不能用来测量小电阻。

2.2 双臂电桥

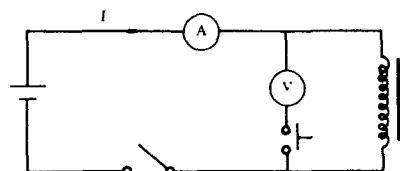


图2-1 测量小电阻接线图

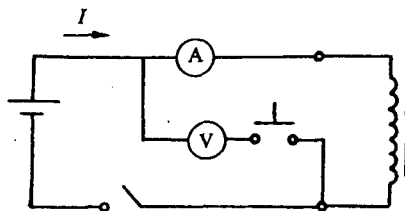


图2-2 测量大电阻接线图

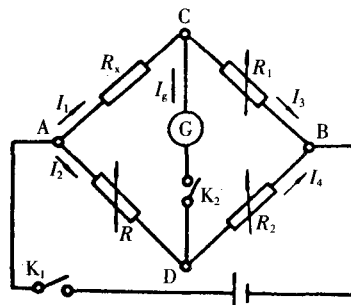


图2-3 单臂电桥原理图

双臂电桥的原理图见图2-4、图2-5。其接线特点是连接 R_x 及 R_N 的试验用连接线分成电流线和电压线,使通过电流的引线及其接线的接触电阻上压降不引入桥内,而是利用电压线把 R_x 及 R_N 上的压降引到桥内平衡,这样就消除了接触电阻及引线电阻的影响。所以,在测 10Ω 以下的电阻时可保证准确性。

图中 R_x 是被测电阻, R_N 是标准电阻。当电桥平衡时, R_x 为:

$$R_x = R_N(R_1/R_2) \quad (2-4)$$

电桥有两组比率臂(R_1/R_2),所以被称为双臂电桥。其特点:一是在改变桥臂电阻 R_1 与比率臂电阻时,两组比率臂的比率相等;二是无论怎样调节, R_1 与 R_2 的数值总是大于 10Ω ,因而消除了连线和接触电阻的影响。一般跨接导线 r 小于 0.001Ω 。

现举例如下:若要测量 R_x 在 $0.1\Omega \sim 1\Omega$,选 $R_N = 0.1\Omega$, $R_2 = 1000\Omega$,则调节 R_1 ,使其值在 $R_2 \sim 10R_2$ 之间。

若所测的 R_x 很小,比如 $0.0001\Omega \sim 0.001\Omega$,可以采用反接法,即把 R_x 与 R_N 位置对调,则其计算如下:

$$R_x = R_N(R_2/R_1) \quad (2-5)$$

这种电桥需要准备一套标准电阻 R_N ,其值为 $0.001\Omega, 0.01\Omega, 0.1\Omega, 1\Omega, 10\Omega$ 。如QJ36型直流两用电桥。

另一种双臂电桥是把内部两组比率臂之比固定,把图2-4的 R_N 变成可调电阻 R ,见图2-5。

当电阻平衡时, R_x 为:

$$R_x = R(R_1/R_2) \quad (2-6)$$

R_1 与 R_2 可做成固定值,电桥比率臂之比为 $0.0001 \sim 10$ 倍。

这种电桥不需另备标准电阻 R_N ,使用方便,选好 R_1/R_2 ,调节电阻 R 得到平衡时,用 R 乘比率臂即为 R_x 。

3 变压器绕组直流电阻测试仪

随着电子技术和微处理器技术的飞速发展,国内外将微处理机应用到变压器直流电阻测量试验中,出现了多种基于直流压降法的自动测量仪器,使变压器绕组直流电阻测量提高到一个新的水平。

这类仪器基本原理见图2-6。整机主要由稳压稳流电源、放电线路、放大滤波电路、模数变换(A/D)、微处理器(CPU)及显示器、打印机和接口组成。 R_N 为标准电阻, W_1 、 W_2 分别为被测变压器绕组。当回路通过恒定电流 I 时,可测出 W_1 、 W_2 上电压降 V_1 、 V_2 。这时 $V_1 = IR_1$, $V_2 = IR_2$, $V_N = IR_N$,可得:

$$R_1 = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_N} \cdot R_N$$

$$R_2 = \frac{V_2}{I} = \frac{V_2}{V_N} \cdot R_N$$

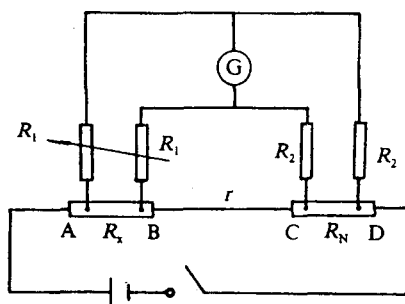


图2-4 双臂电桥原理图之一

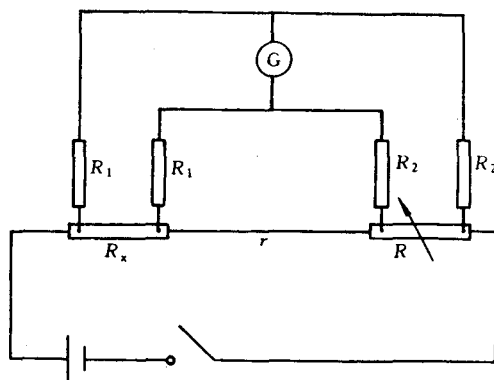


图2-5 双臂电桥原理图之二

整机由微处理器控制,自动完成自校、稳流判断、数据处理、测量结果显示及打印。稳压稳流电源的电压一般为20V~60V或更高;电流一般为多挡可选,最大输出电流已达到50A,以适应特大容量变压器绕组直流电阻的测量。为了防止测量结束后改线时绕组产生感应

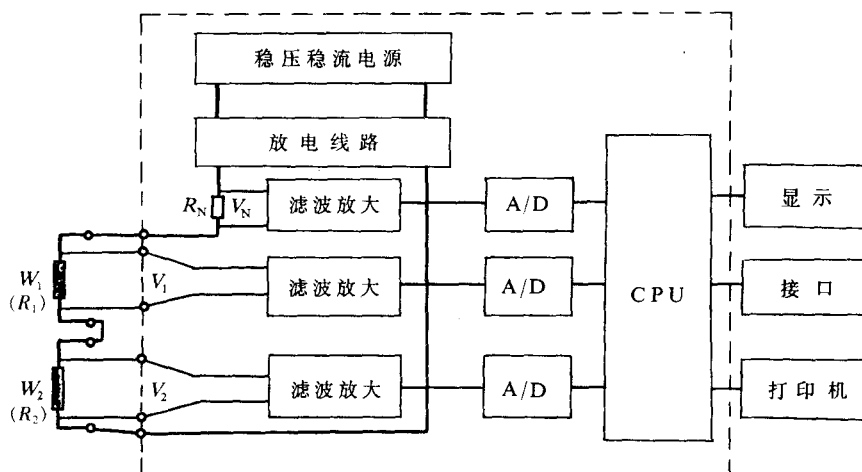


图2-6 变压器直流电阻测试仪框图

电势,对仪器造成损坏,有的仪器还在输入端加装瞬态电压保护电路。一些仪器还设计了GPIB接口,与PC机连接后,可实现PC机对该仪器的遥控,以组成变压器试验自动测试系统。

这类仪器国内常见的有瑞士产2282、2288,国产有JD2540、FK-Ⅲ、BRT-1、TG-3960-7、BKZ-2、PS-2等型号。这些仪器量程大致在0.5mΩ~200Ω以上,准确度为0.1%~0.2%。

用变压器直流电阻测试仪测大容量变压器绕组直流电阻时应注意:

- (1)变压器绕组电感很大,测量结束后应充分放电后才能断开接线,否则往往因绕组产生反电势而损坏测量仪。
- (2)测试过程中必须避免稳压稳流电源线路断路和电源断电。
- (3)测量结束后充分放电前,不允许无励磁调压绕组改换分接位置。

第三节 快速测量直流电阻的方法

变压器绕组具有很大的电感和很小的电阻,尤其是其容量越大,绕组的电感就越大,而电阻越小,因而其时间常数较大。测量绕组电阻时,当接通直流电源后,充电电流要经过一个暂态过程才能达到稳定值。暂态过程持续时间,对小型变压器来说,一般要几分钟,而对高电压特大型变压器可达几十分钟以上,甚至测量一台500kV级三相变压器需6h。所以,缩短暂态过程时间,加快测量速度,具有重要意义。特别是做变压器温升试验时,用测量电阻来计算绕组平均温升,应从负荷切断以后1min以内开始测量,在10min~12min内,每隔30s~60s进行一次测量,而且测量的电阻要准确。因此,快速准确测量直流电阻是很重要的问题。

变压器绕组电阻测量的等效电路原理见图2-7。其中 L_x 、 R_x 为充电电感与被测电阻。

其电流方程式是:

$$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2-7)$$

式中 τ ——时间常数, $\tau = L/R$

充电电流变化见图2-8。

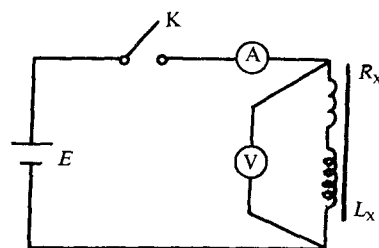


图2-7 测量接线原理图

$$\text{当 } t=\tau \text{ 时, } i=\frac{E}{R}(1-e^{-1})=0.632I$$

$$\text{当 } t=\infty \text{ 时, } i=\frac{E}{R}(1-0)=I$$

$$\text{当 } t=5\tau \text{ 时, } R_x'=\frac{E}{0.993I}=1.0067R_x, R_x' \text{ 比实际 } R_x$$

有+0.67%的误差。因此充电时间要大于 5τ 。

各 τ 与电流的关系见表2-2。

例如一台大型变压器, 高压绕组 L , 约115H, 电阻 0.484Ω , 则 $\tau=115/0.484=238s, 5\tau=1190s=19.8\text{min}$, 因此充电电流要经20min以后才能稳定。

从时间常数 $\tau=L/R$ 可以知道, 减少 τ , 缩短充电时间 t 有两种方法, 一是减小电感 L , 二是增加回路电阻 R 。

试品电感 L 由下式表示:

$$L=\frac{\Phi}{I}=\frac{KInS}{Il}\mu=\frac{KnS}{l}\mu \quad (2-8)$$

式中 $K=0.4\pi\times 10^{-6}\text{H/m}$;

n ——匝数;

S ——铁心截面, cm^2 ;

l ——铁心回路长度, m ;

μ ——导磁系数。

从式(2-8)可知, 变压器绕组的电感量 L 决定于绕组的匝数、铁心的几何尺寸和硅钢片的导磁系数。对被试变压器来讲, n, S, l 是已知的, 只有 μ 是能改变的。

图2-9为铁心磁通密度 B 与磁场强度 H , 导磁系数 μ 与磁场强度 H 的关系曲线。

当磁场强度 H 很大, 铁心磁通密度趋于饱和时, μ 就大幅度下降, 变压器的电感 L 也随之减小。

从 $H=nI/l$ 来看, 要增大 H , 就要增大 I , 也就是提高稳定电流。一般施加电流达2~3倍空载电流, 才能有效地减小 L 。另一方面, 在回路内串入一个电阻 R , 增大了回路电阻, 同样也可减小时间常数 τ 。

$$\tau=L/(R_x+R)$$

$$i=\frac{U}{R_x+R}(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2-9)$$

从图2-10可见, 当合上 K 之前将 R 调至最大值, K 闭合瞬间, $i=0$, 电压 U 全部用来平衡绕组中的感应电势, 随后电流 i 开始上升, R 随 i 的上升而适当地减小, 使 R 值能保证预定的

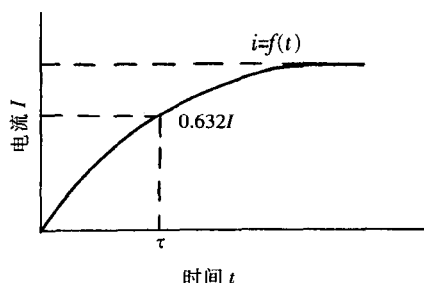


图2-8 电流增长时间曲线

表2-2 测量电流和充电时间的关系

t	0	0.5τ	τ	2τ	3τ	4τ	5τ	6τ
i	0	$0.394I$	$0.632I$	$0.865I$	$0.95I$	$0.98I$	$0.993I$	$0.998I$

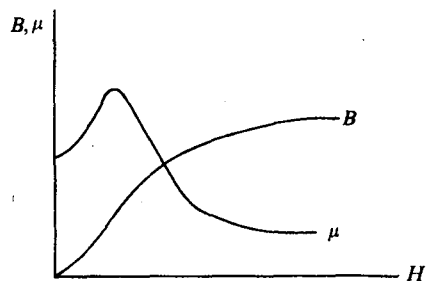


图2-9 磁通密度和导磁系数与磁场强度的关系曲线

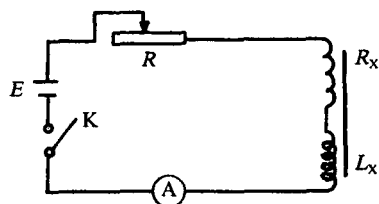


图2-10 增加回路电阻

稳定电流 I 。增加测量回路的电阻以减小充电电流上升的时间常数。为了使导磁系数 μ 下降来减小 L ，还应适当提高电源电压 E ，进一步减小时间常数，加速 i 的上升。

因此，不论增大回路电流 I 以减小电感 L 的影响，或是增大回路电阻，都是为了减小时间常数 τ ，但都需要增加直流电源的电压和容量。

为了实现快速测量直流电阻，变压器试验人员采取各种各样的手段，取得了实践经验，促进了试验工作的进展。

1 非测绕组短路去磁法

测量直流电阻时，不论采用电桥法还是压降法，只有在电流达到稳定后才能读数。另外，由于要消除其他绕组之间互感的影响，非测绕组必须开路。

如果非测绕组直接短路，那么对测量直流电阻有何影响呢？现举例说明。

以容量为50 000kVA，电压为121/10.5kV，联结组为YNd11变压器为例，按单相计算，其电感、电阻数值见图2-11。

在图2-11(a)中

$$i_1 = \frac{E}{r_1} \left[1 + \frac{r_1 + L_1(1-K^2)a_2}{L_1(1-K^2)(a_1 - a_2)} e^{a_1 t} - \frac{r_1 + L_1(1-K^2)a_1}{L_1(1-K^2)(a_1 - a_2)} e^{a_2 t} \right] \quad (2-10)$$

$$i_2 = \frac{EM}{(1-K^2)(a_1 - a_2)L_1L_2} (e^{a_1 t} - e^{a_2 t}) \quad (2-11)$$

$$\frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} = K \quad (2-12)$$

$$a_{1,2} = -\frac{r_1L_2 + r_2L_1}{2L_1L_2(1-K^2)} \pm \sqrt{\frac{(r_1L_2 + r_2L_1)^2}{4L_1^2L_2^2(1-K^2)^2} - \frac{r_1r_2}{L_1L_2(1-K^2)}} \quad (2-13)$$

式中 r_1, L_1 ——变压器一次电阻、电感；

r_2, L_2 ——变压器二次电阻、电感；

E ——直流电源电压；

M ——互感；

K ——耦合系数；

a_1, a_2 ——系数。

将 r_1, r_2, L_1, L_2 及 $E=2V$ 的数值代入式(2-10)~式(2-13)。因变压器两绕组属于紧密耦合，所以 $K < 1$ 。设 $K=0.96$ ，因此得：

$$a_{1,2} = -0.047 \pm 0.045$$

$$\text{则 } a_1 = -0.002, a_2 = -0.092$$

$$i_1 = 4.13 \times [1 - 0.426e^{-0.002t} - 0.574e^{-0.092t}]$$

当 $t > 0 \text{min}$ 时，最后一项可以忽略不计，其 i_1 数值见表2-3。

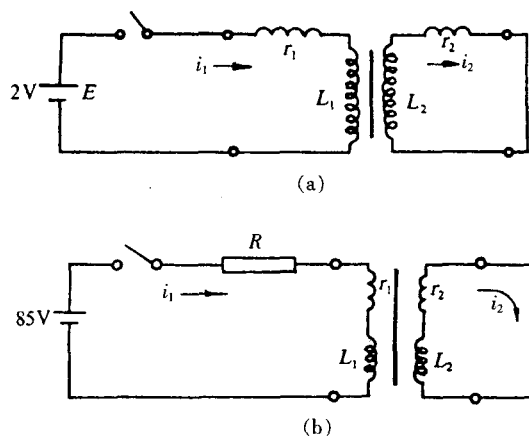


图2-11 测量线路图

$$r_1 = 0.484 \Omega \quad r_2 = 0.00825 \Omega \quad L_1 = 115 \text{H} \quad L_2 = 2.6 \text{H}$$

表 2-3 电流 i_1 数值 (I)

t/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
i_1/A	0	2.57	2.75	3.90	3.04	3.16	3.28	3.37	3.46	3.53	3.60	3.66	3.71	3.76	3.80	3.84	3.87	3.90
占 $I/\%$		62	67	70	74	77	79	80	84	85	87	89	90	91	92	93	93.7	94.4

表 2-4 电流 i_2 数值 (II)

t/min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
i_2/A	0	13.92	12.35	10.95	9.72	8.62	7.65	6.78	6.01	5.34	4.73	4.19	3.72	3.30	2.92	2.59	2.3	2.04

$$M=0.96\sqrt{115\times 2.6}=16.6$$

$$i_2=15.7e^{-0.002t}-15.7e^{-0.092t}$$

最后一项可以忽略不计,其 i_2 数值见表 2-4。

由以上计算可知,当接通直流电源以后, i_1 增加得很快,这是因为在二次电路中, i_2 具有相反的方向,阻滞了磁通的上升,因而使在原电路中反向的感应电势较小。见图 2-12。

有人利用短路绕组中电流的去磁作用,使充电电流瞬间跳到稳定值,这时短路绕组去磁作用便自动消失,则可快速测量电阻,其结果不受任何影响。只不过需要在测量回路中串一电阻 R (见图 2-11b),设 R 为 20Ω 。若要保持电流不变 (4.13A),则需加 85V 电压。

除电阻 $=R+r_1=20+0.484=20.484\Omega$ 外,其余数据仍同上。把数据代入式 (2-10)~式 (2-13)

则 $a_{1,2}=-1.156\pm 1.154$

$$a_1=-0.002, a_2=-2.31$$

$$i_1=4.15\times[1-0.016e^{-0.002t}-0.984e^{-2.31t}]$$

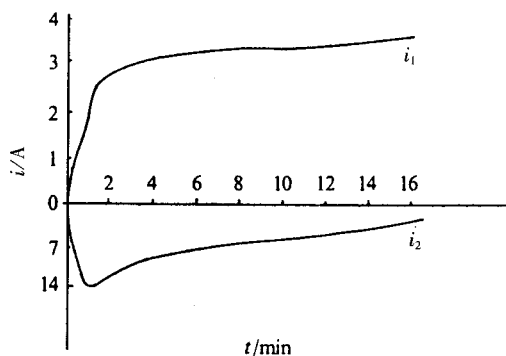
$$i_2=26.08e^{-0.002t}-26.08e^{-2.31t}$$

当 $t>0\text{min}$ 时忽略 i_1, i_2 的最后一项,可计算出 i_1, i_2 , 如表 2-5、表 2-6。

从表 2-5、表 2-6 及图 2-13 可知,一通电,电流 i_1 很快跳变到稳定值,所以对测电阻是快速而准确的。

这个方法关键在于要外串足够限流电阻,相应提高直流电源的电压和容量,使回路中的电流自由分量变得微小,即短路绕组有极强的去磁作用,使测量电路中的充电电流发生跳变,从而使充电能瞬间完成。

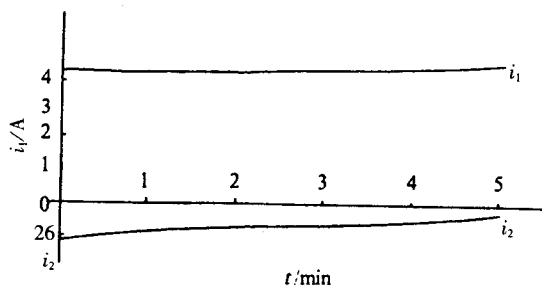
这个方法对做温升试验测热电阻有重要意义。因为传统的做法是非测绕组必须开路,目的

图 2-12 变压器绕组 i_1, i_2 与 t 的关系曲线 (I)表 2-5 电流 i_1 数值 (II)

t/min	0	0.5	1	2	3	4	5
i_1/A	0	4.088	4.092	4.096	4.104	4.109	4.113

表 2-6 电流 i_2 数值 (II)

t/min	0	0.5	1	2	3	4	5
i_2/A	0	24.56	23.13	20.52	18.20	16.14	14.32

图 2-13 变压器绕组 i_1, i_2 与 t 的关系曲线 (II)

是消除互感的影响。非测绕组短路,而对测量电阻没有影响,这是变不利因素为有利因素,可提高工效。

2 快速测量低压绕组电阻法

该法为高低压绕组串联,利用高压绕组助磁,快速测量低压绕组电阻的方法。

前面已提到,当铁心磁密很大趋于饱和时,磁导率 μ 大为下降,绕组的电感 L 随之减小。若将低压绕组通以电流,使铁心饱和则需几十安以上。由于高压绕组匝数是低压绕组匝数若干倍,因此需要励磁电流较小,通常通以5~10A即可满足特大型变压器的要求。若采用高低压绕组串联助磁快速充电(见图2-14),则高低压绕组的电流方向要一致。这样低压绕组的电感就减小,从而缩短了测试时间。

我们推荐在对铁心为五柱式,低压d结大容量变压器直流电阻测量中使用这种方法,也可用微机监测手段,用降压法测定低压绕组电阻。

$$R_{HV}=R_N \frac{V_{HV}}{V_N}, R_{LV}=R_N \frac{V_{LV}}{V_N}$$

同样,也可用电桥法测量。

3 电阻突变法

它的原理是使电路的过渡过程从一种自然参数决定的过渡过程强制到另一种自然参数决定的过渡过程。

电阻突变法原理图见图2-15。在测量回路中串入一附加电阻 R ,合上 K_1 ,闭合 A_N ,将 R 短接,使全部电压加于被试绕组上,强迫它有较大的电流上升,一直到预定 I 值,再断开 A_N 。电流 $i_1 = \frac{U}{R_X}$

$\left[1 - \exp\left(-\frac{R_X}{L}t\right)\right]$,并很快由 i_1 (曲线1)稳定到 i_2 (曲线2),从而把充电时间由 t 减小到 t' 。

$i_2 = \frac{U}{R_X + R}$

$\left[1 - \exp\left(-\frac{R_X + R}{L}t\right)\right]$,其时间常数 $L/(R_X + R)$ 减小了,这就提高了充电速度。当串接附加电阻时,同时要提高直流电源电压,增大容量。

3.1 单臂电桥的电阻突变法

采用图2-16测量时,要求附加电阻 $R > 4R_X$ 。在图2-16中,先合 K_1 ,再合 A_N ,电源 E 直接向 R_X 充电。待充电电流等于或稍大于 I 时,断开 A_N ,此时,预定电流 $I = E/(R_X + R_1 + R)$,观察电流表稳定后就

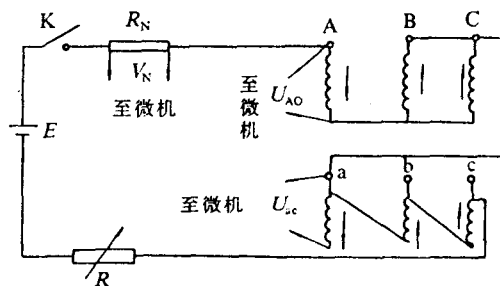


图 2-14 高低压绕组串联助磁快速测量低压绕组电阻原理图

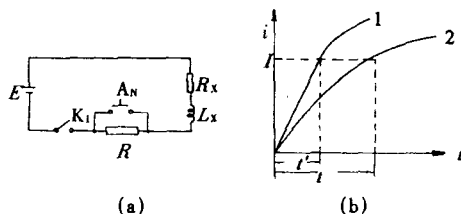


图2-15 电阻突变法原理图
(a) 电路图 (b) 电流变化曲线

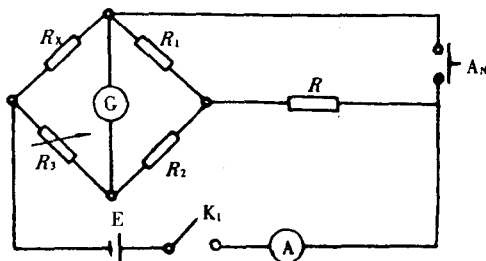


图2-16 单臂电桥电阻突变法测量
 K_1 —电源开关 A_N —短路附加电阻的按钮
 R_X —被试电阻 R_1 —标准电阻

可正常操作了。

3.2 双臂电桥的电阻突变法

该法有两种情况：

3.2.1 QJ36双臂电桥(见图2-17)

预计电流 $I = U / (R_x + R_N + R)$ 。在图2-17中, 闭合 A_N , 使电源 E 直接提供被测电阻 R_x 电流, 把 $R + R_N$ 短接起来。

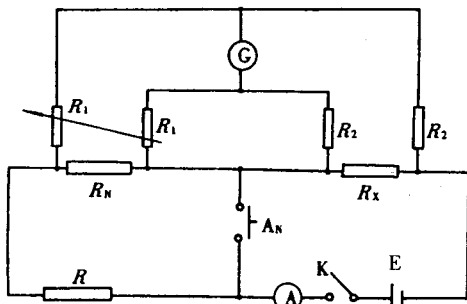


图2-17 缩短回路充电时间(I)

K—电源开关 A_N —短路按钮 R —外串附加电阻

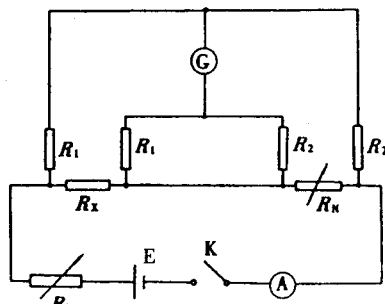


图2-18 缩短回路充电时间(II)

3.2.2 QJ44双臂电桥(见图2-18)

R_b 是串入电源电路中用来改变电流缩短充电时间的可变电阻。 R_b 的值在 $0.5 \sim 5 \Omega$, 电源电压用 $6 \sim 12V$ 直流电源。开始接通时, 把 R_b 调到较小值, 使 I 达到预定值。最后调 R_N 使电桥平衡。

4 全压—恒流电源法

全压—恒流电源法是建立在电路的强制稳态的基础上, 为研究大电感电路的过渡过程和对电桥灵敏度的影响而提出来的。它是电阻突变法的发展。

全压—恒流电源法的原理见图2-19。

试验开始, 全压开关 K 闭合, 全压电源通过采样电阻 R_c 和全压开关 K 加到电桥电源端钮 $+$ 、 $-$ 端子上, 经过电桥电路对被试品绕组进行充电。 E 的幅值取决于试品的 L_x 、 R_x 所要求的充电时间和满足电桥灵敏度要求的恒流值 I_0 。当充电至 t_1 时, 回路电流瞬时值为 I_0 , 采样电阻压降 $UR = I_0 R_c$, 经比较放大和执行电路使 K 自动断开。于是, 隔离二极管 D 自动导电, 恒流电源向被试品绕组供给 I_0 电流。电路的电流被强迫稳定在 I_0 上, 电路进入强制稳态。

全压—恒流充电过程的电流电压波形图见图2-20。全压—恒流充电过程都是自动进行, 充电时间很短, 与测量时间相比, 可以忽

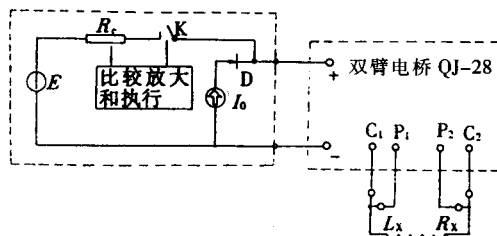


图2-19 全压—恒流电源法原理图

E —全压电源 R_c —全压充电电流采样电阻
 D —隔离二极管 L_x 、 R_x —分别为被测试品电感和电阻

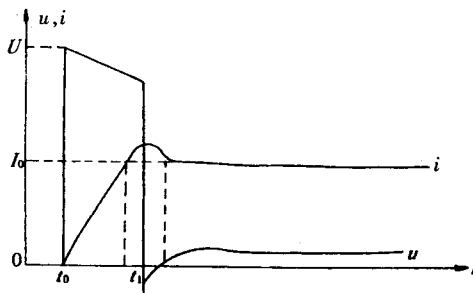


图2-20 全压—恒流充电过程的电流、电压波形图

略,这就提高了工效。

国内生产的QHY-5型就是一种全压恒流电源。其技术指标:全压电源为45V,恒流电源为4V,稳定度为0.01%,纹波系数为0.2%。该电源可配合 QJ-36 和 QJ-44 电桥使用。

现以QHY-4型为例,它包含两个电源:全压电源45V,恒流源4V。电源主回路见图2-21。

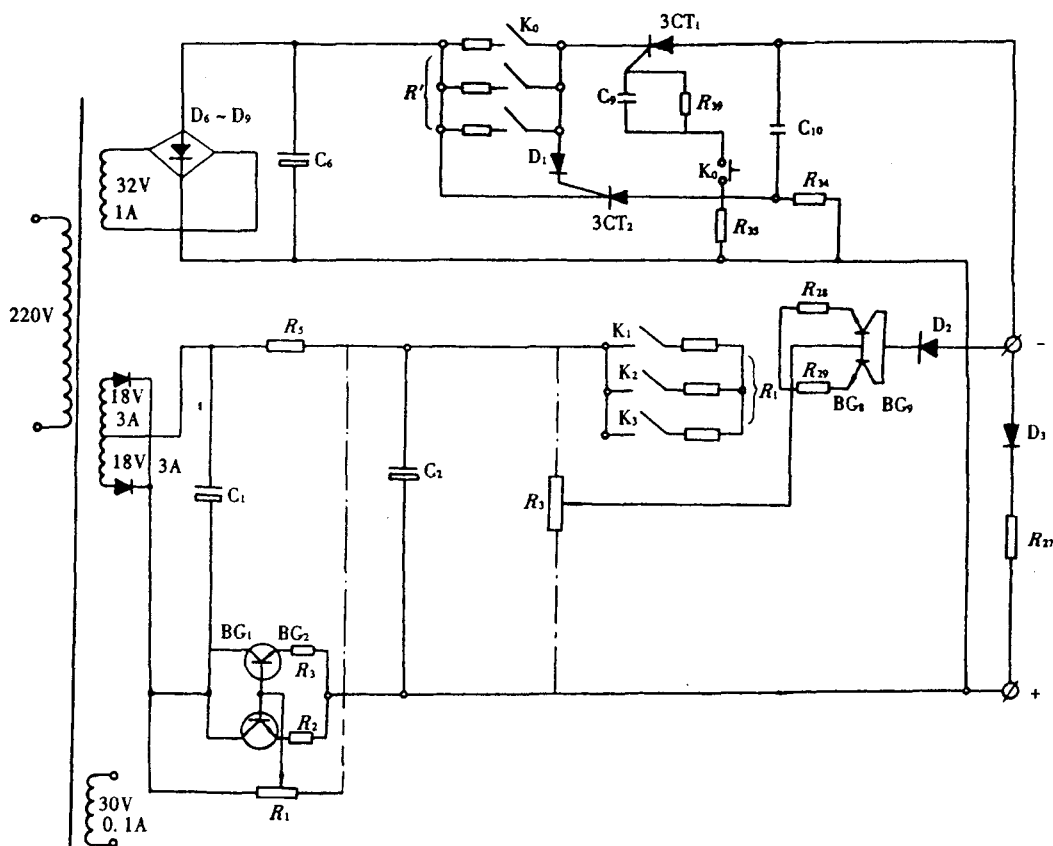


图2-21 QHY-4全压—恒流电源的主回路

电源主回路的运行原理如下:

电源变压器一次侧是220V,有三个绕组。第一个绕组中心抽头,上下绕组电压为18V,电流3A,第二个绕组输出32V、1A,第三个绕组输出30V、0.1A。

第二个绕组经桥式整流和电容滤波,由可控硅整流器构成全压开关直接连接到电桥的输出端按钮上,构成电压电源。当 K_0 闭合,可控硅 $3CT_1$ 导电,全压经量限电阻 R' 给被试品快速充电。此时,电容器 C_{10} 也经 $3CT_1$ 充电。当充电电流达到恒流电流数值时,量限电阻 R' 两端的电压 $UR'=I_0R'$ 超过 D_1 的导电压降0.7V和可控硅 $3CT_2$ 的触发电压之和, $3CT_2$ 导电, C_{10} 经 $3CT_2$ 对 $3CT_1$ 放电,使其截止,切断回路电流,于是全压充电结束。

第一个绕组经双半波整流后,由大功率硅管 BG_1 和 BG_2 稳压在15V。大功率硅管 BG_3 和 BG_4 经 K_1 、 K_2 、 K_3 与量限电阻 R_1 串联,接在15V的稳压电源上,接成串联调整式的恒流源。 D_2 为隔离二极管,以防全压充电时很高的全电压击穿调整管。这是恒流电源的主回路。

当全压充电结束时,隔离二极管 D_2 自动导电,恒流电源向被试品绕组供给 I_0 电流,经比较放大电路使电流保持恒定,即电路的电流被强迫稳定在 I_0 上,进入强制稳态。

第三个绕组经桥式整流和参数型稳压后,提供辅助电源供集成电路。

5 随机测量法

由于变压器绕组的电感大,电阻小,通直流电后电流上升缓慢,因此瞬时的电压降 U 是电阻压降 iR_x 加上电感压降 $Li\frac{di}{dt}$ 之和。要想随时测出电阻值,必须减去电感压降。为此,二次侧测出的感应电势,应折算到一次侧来。我们知道:

$$U=iR_x+L_1\frac{di}{dt} \quad (2-14)$$

$$\text{因为 } e_{11}=-N_1\frac{d\Phi}{dt} \quad (2-15)$$

$$e_{12}=-N_2\frac{d\Phi}{dt} \quad (2-16)$$

$$\text{所以 } e_{11}=\frac{N_1}{N_2}e_{12}=ke_{12} \quad (2-17)$$

$$iR_x=U-e_{11}=U-ke_{12}$$

$$R_x=\frac{U-ke_{12}}{i} \quad (2-18)$$

式中 k ——电压比。

由式(2-18)可知,采用瞬态记录仪随时记下 i 、 U 及二次感应电势 e_{12} , k 是已知的。通过编制计算程序,则可随时显示 R_x 值,随时打印。

这种随机测量法(原理电路图见图2-22)的关键在于要在同一时刻记录下 i 、 U 和 e_{12} 的瞬时值。当然,测试仪器是否具有足够的记录速度和准确度以及抗干扰能力也是非常重要的。这个办法,不受时间或电流波动的限制,并随时得出测量结果,特别是对温升试验测热电阻更为简便。

6 简便短接法

如果变压器的绕组有无励磁分接开关时,当测完一个分接电阻,先断电源,后再切换分接,重新送电,此时充电电流又重新按指数曲线上升,因此很费时间。如果在测定一个分接之后,先把非试绕组短路,根据电磁感应原理,原有的测量绕组的磁能为 $\frac{1}{2}LI^2$ 。当切换分接时,该磁能就转移到非测绕组中去,然后再打开非测绕组,它又转回测量绕组。该磁能虽有点消耗,但电流基本变化不大,很快就稳定了,就可以继续测量该分接电阻。因此,测量一相电阻,仅需充电一次,断电一次,这样至少可缩短一半时间。但要注意的是,如果是用双臂电桥来测,在切换分接之前,要将两根电位线断开,以免有反电势把电桥击穿,或者在两电位线之间跨接一电容器来消除过电压。另外,在切换分接时可能在开关定触头与动触头间产生电弧。由于施加电流不大,电弧能量不大,只有小小的火花,而且在油中不会有太高温度,是不会烧伤开关的。

如果是测量器身电阻,当切换无励磁开关时,可将两分接用短路导线跨接,这样相当于有载调压开关一样电流连续不断,可提高测量效率。

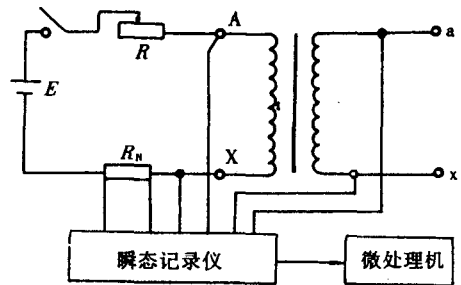


图2-22 测量原理电路图

R —调节电阻 R_N —标准电阻

第三章 电压比测量

第一节 概 述

变压器是一种利用电磁感应原理通过变换电压来传输电能的设备，而电压变换是靠改变原副边匝数来实现的一种变换。

如果忽略损耗和漏磁，感应电势就与匝数成正比，即变压器的电压比为：

$$K_{12} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3-1)$$

式中 K_{12} ——变压器的电压比；

U_1, U_2 ——变压器的原副边电压；

E_1, E_2 ——变压器的原副边感应电势；

N_1, N_2 ——变压器的原副边匝数。

电压比测量是验证变压器的设计与制造效果的首要项目之一，其目的是检查变压器各个绕组匝数及电压比是否正确或合乎要求。尤其在半成品试验中更要认真测试和严格控制。成品的各分接电压比必须符合标准或技术合同要求。

表 3-1 空载电压比的允许偏差

空载电压比	规定的第一对绕组	主分接	a.规定电压比的 $\pm 0.5\%$ b.实际阻抗百分数的 $\pm 1/10$	取其中低者
		其他分接	按协议，但不低于 a 和 b 中较小者	
	其他绕组对		按协议，但不低于 a 和 b 中较小者	

电压比设计偏差一般规定为 $\leq \pm 0.25\%$ 。试验允许偏差按国标 GB1094.1—1996 规定，见表 3-1。由于允

许制造偏差小，因而要求测量仪表仪器准确级次要高一挡。目前电压比试验采取不同的试验仪器和多种试验方法，现简要介绍如下。

第二节 电压测量法

电压测量法是电压比测量最基本的方法。以前一般称为双电压表法或电压表法。究其试验的本质是电压测量，所以称电压测量法比较合理。试验线路见图 3-1。

一般向较高电压绕组输入一适当幅度的单相电压， U_1 和 U_2 可用电压表测量，也可用其他方法测量。

用电压表测量 $K_{12} = \frac{U_1}{U_2}$ 时，由于内阻和准确度较低的电磁式电压表难以保证数据准确，故不宜采用。由于数字电压表准确度高，输入阻抗高，测量范围宽，可以完全满足电压比试验的要求。可选准确度高于 0.1% 的数字电压表进行电压比试验。

电子技术和计算机技术目前已达到相当高的

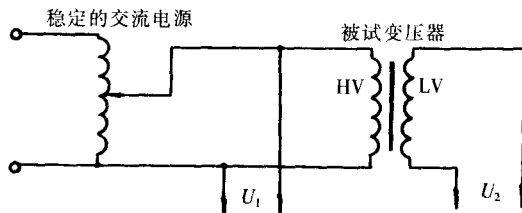


图 3-1 电压测量法原理图

水平,各类专用仪器不断出现。 U_1 和 U_2 还可经数据采集卡采集,由微处理器处理,构成有相当自动化程度的电压比测量仪。

第三节 标准变压器式电桥测量法

该电桥的组成相当于具有多抽头的自耦变压器,其高压AX与被试变压器高压AX并联供电,而其低压a与被试变压器的低压a通过检流计并联,见图3-2。调节电桥可动分接,使微安计指示最小,此时电桥测量的电压比就等于被试产品的电压比。

实质上,该电桥就是利用两变压器的对应绕组电压等于零的原理来制造的。其关键就是制造出高精度的标准变压器来。电桥主要由电压比试验、联结组试验、晶体管放大三部分组成。

该电桥的原型是德国制造的。沈阳变压器有限责任公司与海城电表厂合作对原电桥做了改进。现将改进后的QS24-1型电桥的主要性能介绍如下:

工作电压:交流220V

电压比测量范围:(I)1~100倍

(II)100~1 000倍

测量误差范围:±10%

准确度:±0.1%

测量联结组别:II6,II0

Yy6,Yy0

Yd5,Yd11

该电桥的缺点是体积较大,笨重,无法实现自动测量。

下面再介绍山西省机电设计院研制的ZB3型变压器匝数比测试仪。它的测试基本原理与上述是相同的,见图3-3。

被试变压器 T_X 、精密互感器 T_B 及连接方式选

择开关组成测试电桥。电桥的差值信号 ΔU 经过滤波、放大与 U_N 、 U_X 信号一起送给微处理器。通过操作仪器面板上的键盘,将有关参数、开关量等经过输入接口也送给微机系统。在参数输入状态下,可通过键盘改变各个参数,转换开关位置适应不同变压器的接法转换;在测试状态下,微机通过 ΔU 通道不断检测 ΔU ,判断电桥失衡方向,并通过输出接口转换精密互感器额定电压比,使电桥趋于平衡。待电桥平衡后,微处理器即进行数据处理,求出实测额定电压比及相对于理论值的误差,然后显示、存贮并打印输出。仪器软件框图见图3-4、原理图见图3-5。

ZBX型匝数比测试仪采用了微机与微电子技术,实现了电桥的自动平衡与数据自动处理。它在

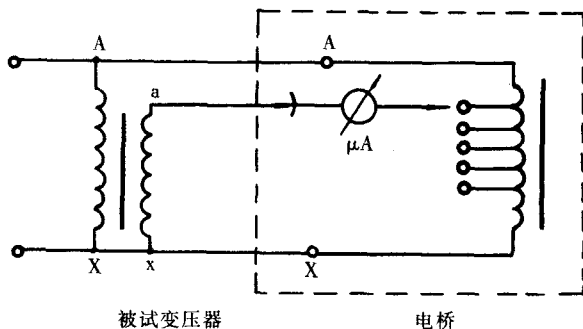


图3-2 标准变压器式电压比电桥原理图

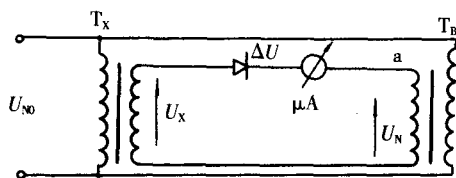


图3-3 匝数比测试基本原理图

4s内能完成一次电压比测试,测试结果可数字显示、存贮及打印输出,操作十分简便,而且体积小,重量轻,携带方便。它可测单相、三相变压器电压比。

其主要技术性能指标如下:

①电压比测量范围:0.900~1.000 (自动变换量程,指标值四位);

②误差测量范围: -19.9%~19.9%;

③精度:0.1%;

④测量时间: <4s;

⑤加载电压:160V (每次测试结束自动切断加载电压);

⑥分接点设置:19个分接点,可任意设置分接值;

⑦联结组选择:任意联结组别;

⑧自动存贮测试结果;

⑨高低压反报警与保护功能。

第四节 电阻分压式电压比电桥

电阻分压式电压比电桥工作原理与标准变压器式电压比电桥工作原理基本相同,只是标准变压器部分换成了精密电阻分压器。精密电阻分压器可以做在桥体内部,也可在桥体外部用标准电阻箱接成,其本质是相同的。电桥工作原理见图3-6。

在被试变压器较高电压侧绕组 (AX) 上施加电压 U_1 , 则在二次侧绕组上感应出电压 U_2 。如果被试品的电压比完全符合额定电压比 K , 调整 R_3 使平衡指示器指零, 设触点 C 处

$R_{MC} = R_{CN} = \frac{1}{2} R_3$, 则电压比 K 可按下式计算:

$$K = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + \frac{1}{2} R_3} \quad (3-2)$$

如果被试品的电压比不是标准电压比 K , 而是有一定误差的, 这时不再改变 R_1 的电阻值, 只改变触点 C 的位置即可。当该点能使检流计指零时, 则试品的实测电压比 K' 用下式计算:

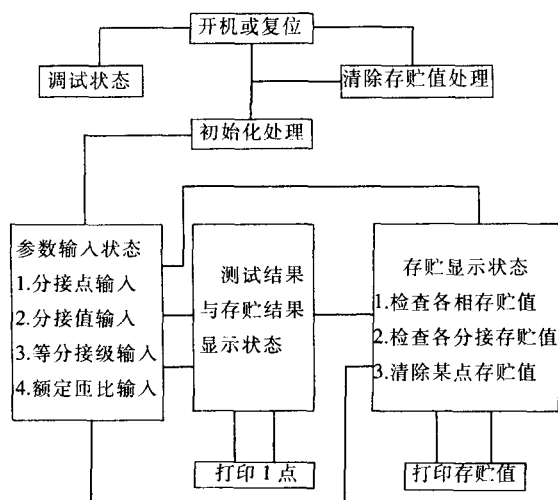


图3-4 匝数比测试仪软件总框图

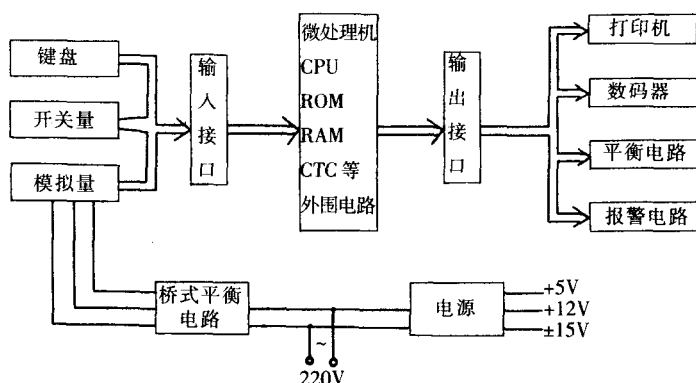


图3-5 匝数比测试仪硬件总原理图

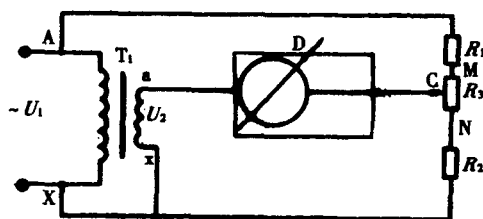


图3-6 电阻分压式电压比电桥工作原理图

T_1 —被试变压器 R_1, R_2, R_3 —电阻分压器

D—平衡指示器

$$K' = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + \frac{1}{2}R_3 + \Delta R} \quad (3-3)$$

式中 ΔR 为C点偏离 R_3 中点的电阻值。被试品的电压比误差 $\delta(\%)$ 可用下式计算：

$$\delta = \frac{K' - K}{K} \times 100 \approx \frac{-100\Delta R}{R_2 + \frac{1}{2}R_3} \quad (3-4)$$

若最大 $\delta = \pm 2$ ，取 $R_2 + \frac{1}{2}R_3 = 1\,000\Omega$ ，则 $\Delta R = \pm 20\Omega$ 。也就是说，误差在 $\pm 2\%$ 范围变动时，滑杆C点需在 R_3 中点 $\pm 20\Omega$ 范围内变动。当从X点算起，那么， $R_{xc} = 980 \sim 1\,020\Omega$ 。

显然， R_3 是为测出被试品电压比误差而设的。当滑杆C点在 R_3 上滑动时，C点电位也将相应变化，在一定的范围内和 U_2 达到平衡。

从C点和a点引出的信号接入平衡指示器。平衡指示器一般是由放大器、相敏整流器和指零仪表组成。电阻分压式电压比电桥的一个例子是QJ-35型电压比电桥，其原理图见图3-7。

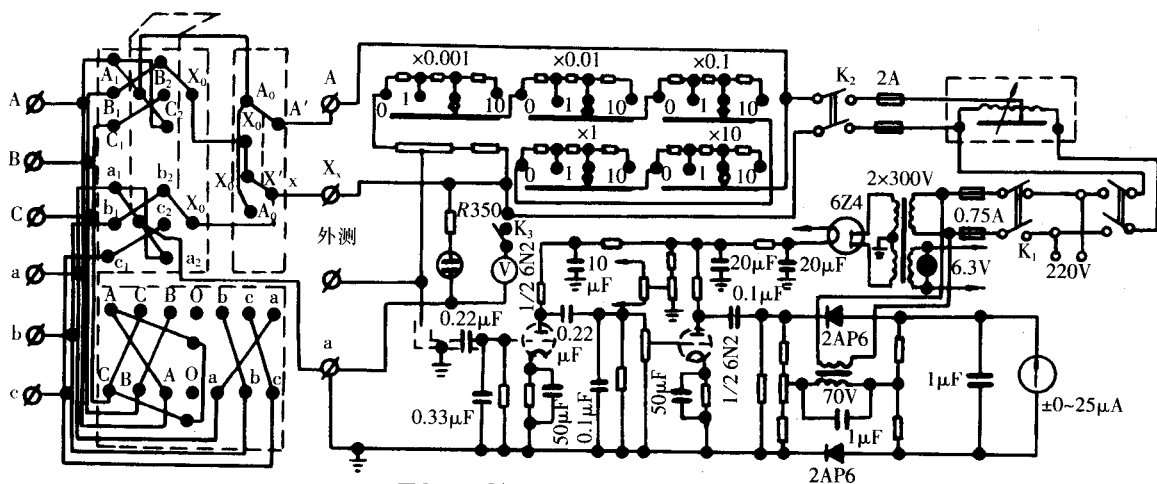


图3-7 QJ-35型电压比电桥线路图

第五节 电压比测量的自动化

电压比测量自动化是实际生产和现场试验中为了提高效率而提出的要求。电子技术和微处理器技术的高速发展为电压比测量的自动化提供了良好的条件。国内外已推出了多种电压比自动测量仪。部分国内外电压比自动测量仪的技术参数见表3-2。

电压比自动测量仪的基本测量原理还是前面所述的电压测量法和

表 3-2 部分国内外电压比自动测量仪技术参数

型号	电压比测量范围	准确度/%	测量时间/s	励磁电压/V	备注
2793	0.8~9 999.9	$\pm 0.1 (< 2\,000)$	2	100, 40, 10 可选	国外制造
2791	0.18~1 999.9	± 0.1 读数	2	75 或 100 可选	国外制造
ASQJ-1	1~1 000	± 0.05	< 4	220	
TRM-2	1~1 999.9	± 0.1			
WT2765	1~9 999.9	± 0.1		220	
ZB-3	0.9~1 000	$\pm 0.1, \pm 3$ 个字	< 4	160	
ZBC-2	1~15 000	± 0.1			
ZBY-ⅡB	1~9 999.9	± 0.2			

电桥法一样。它一般采用单片机作为微处理器,接收面板键盘和开关量的输入,对量程、电桥平衡进行自动跟踪控制,并对测量结果进行数据处理,最后,将测量结果存贮、打印,快速完成电压比的测量。

一种典型的电压比自动测量仪的基本原理见图3-8。

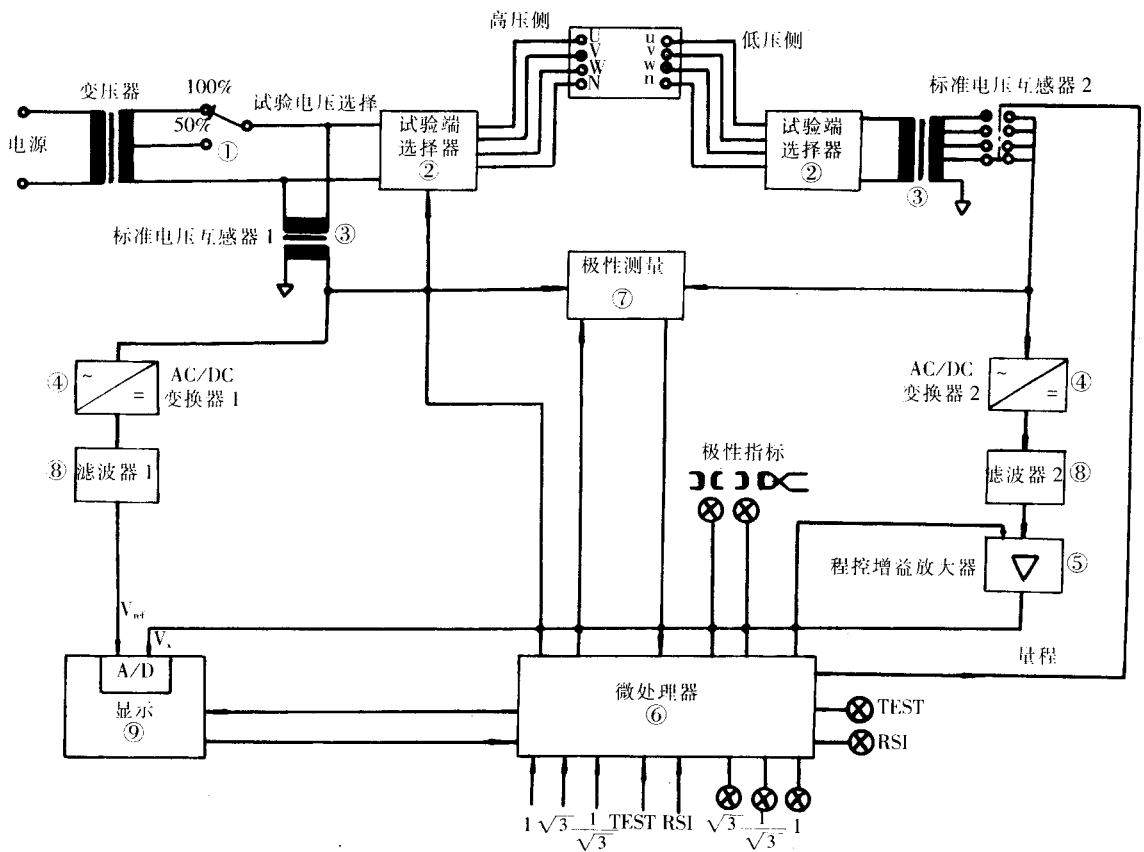


图3-8 电压比自动测量仪基本原理方框图

工频试验电源 U_1 经试验端选择器1选择后,加入被试变压器的较高电压侧绕组,较低电压侧感应电压经试验端选择器2选择后得 U_2 。 U_1 经标准电压互感器1变换成适合电子电路处理的幅值,由AC(RMS)/DC变换器1变换为直流电压,滤波后得到基准电压 V_{ref} 。同样, U_2 经标准电压互感器2、AC/DC变换器2和滤波器得到直流电压,再经程控增益放大器放大得到 V_x ,与 V_{ref} 同时进入相除模/数变换器,微处理器根据输入的额定电压比、测得的 V_{ref} 、 V_x 以及两台标准电压互感器的额定电压比和放大器的增益等数据进行计算、处理,存贮并显示电压比测量值及与额定电压比的偏差。在电压比自动测量仪中,微处理器是控制和计算的核心部件,它不但要接受额定电压比的输入、控制并读取电压互感器额定电压比的变换数据和程控放大器的增益数据,并据此计算出测量数据,而且它还控制和读取被试变压器高、低压侧连接的试验端选择器以进行三相变压器的电压比测量。

电压比自动测量仪达到高准确度的关键:

(1)高准确度的标准电压互感器。无论是被试变压器高压侧还是低压侧的电压互感器,其准确度都要足够高,这样,才能得到准确的 V_{ref} 和 V_x 。

(2)AC/DC变换器必须高精度和高输入阻抗,以减小对标准电压互感器的分流,保证变换后的

DC电压准确地正比于AC有效值。

(3)微处理器采用单片机,应具有足够的内存和运算处理能力。

(4)配备功能良好的软件,以控制整机工作,并进行数据处理。

另一种电压比测量仪的工作原理见图3-9。

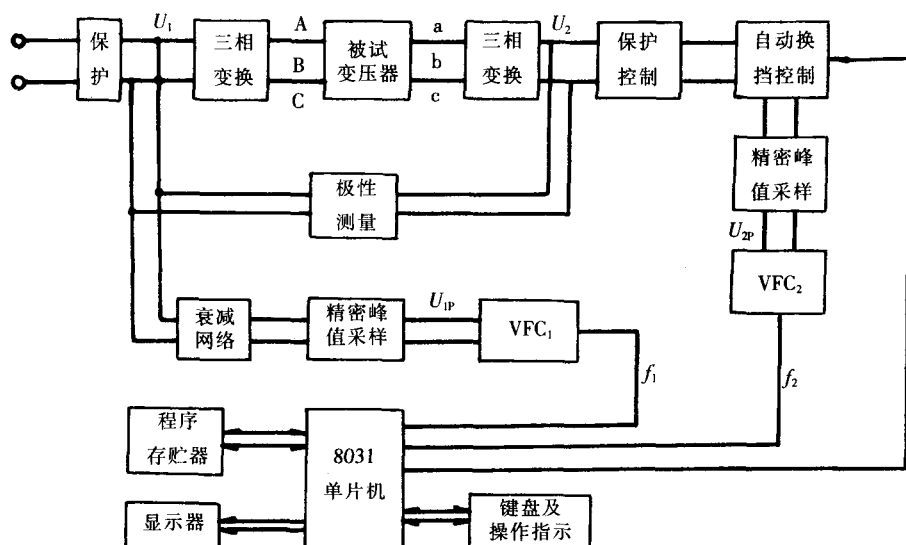


图3-9 一种电压比自动测量仪工作原理框图

图中被试变压器 U_1 和 U_2 分别经衰减网络和自动换挡电路后,各自进行精密峰值采样,检出峰值电压 U_{1P} 和 U_{2P} ,再分别由高精度电压/频率变换器 VFC_1 和 VFC_2 变换成与 U_{1P} 、 U_{2P} 成正比的频率 f_1 和 f_2 ,若电压/频率变换系数为:

$$F_1 = \frac{f_1}{U_{1P}}, F_2 = \frac{f_2}{U_{2P}}$$

则频率比 K' 可表示为:

$$F' = \frac{f_1}{f_2} = \frac{F_1 U_{1P}}{F_2 U_{2P}} = \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{U_{1P}}{U_{2P}}$$

$$\text{令 } \mu = \frac{F_1}{F_2}$$

$$\text{可得 } F' = \mu \frac{U_{1P}}{U_{2P}}$$

假设衰减网络和自动换挡电路的衰减系数均为1,有:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1P}}{U_{2P}}$$

则被试变压器的电压比 K 可按下式算得:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{1P}}{U_{2P}} = \frac{1}{\mu} F' = \frac{f_1}{f_2} \quad (3-5)$$

即可以通过测量 f_1 、 f_2 测出被试变压器的电压比。

由于该自动测量仪采用微处理器作为控制和处理的核心,当衰减网络和自动换挡电路的衰减系数不为1时,微处理器可自动读出衰减系数,在数据处理时加入衰减系数的影响,很容易得到各种情况下的实际测量值。

电压比自动测量仪的功能特点:

(1)在测量过程中,被试变压器一次和二次绕组信号的采样是同步进行的,可以避免电源电压波动的影响。

(2)CPU的数字处理功能很强,一般都可在软件中加入消除噪声的算法、均值算法等处理程序,提高了数据的稳定性和抗干扰性能。

(3)一般都有仪器工作状态和错误信息显示。

(4)电压比自动测量仪由于采用了CPU,可将IEEE488通用仪器控制接口安装于测量仪机内,与PC机连接后,能实现遥控和数据交换,可组成多台仪器的自动测量系统。

电压比自动测量仪有着一般电压比测量仪无可比拟的功能,它们的出现改变了电压比测量的现状,提高了效率。

第四章 联结组标号试验

第一节 概 述

现在,电能一般是由三相发电机发出,并经过三相输电线路送出的,大部分动力设备也都是三相负荷。三相系统是一种最经济的电力系统,因此,三相变压器在电力系统中具有特别重要的作用,而且应用最广。三相变压器也可以由3台单相变压器组成。随着电网容量的增大,需要多台变压器并联运行,其中要求并联运行的变压器必须具有相同的联结组。变压器接线图和联结组决定一次和二次电压间的相位关系,而联结组又与绕组的绕向和出头标志有关。

三相变压器采用不同的绕组联结方式,最普遍的是采用星形(Y)、三角形(D)、曲折形(Z)。联结方式Y、D、Z可以随着线电势的相位移由 0° 起,每隔 30° 到 330° 分别构成12种不同的联结组,对应于时钟字盘的12个数字。联结方式Yy、Dd、Dz可以构成偶数联结组0、2、4、6、8、10。而联结方式Yd、Dy、Yz则构成奇数联结组1、3、5、7、9、11。在我国油浸式电力变压器标准中只采用几种标准接线图和联结组,如Yyn0、Yd11、YNd11、YNyn0d11。

我国变压器厂生产的变压器绕组一般均采用左绕向,而且两绕组的绕向相同,又均以上端为起头,因此两绕组中感应电压相同,这就是所谓减极性变压器。

几种常用的标准接线图及联结组见表4-1、表4-2。其他各种联结组

表 4-1 双绕组变压器接线图及联结组

标号	联结组	高压相量	低压相量	联结组电势相量
Yyn0				
Yd11				
YNd11				
Dy11				

表 4-2 三绕组变压器接线图及联结组

标号	绕组接线图			联结组电势相量	
	高 压	中 压	低 压	高-中	高-低
YNyn0d11					
YNd11d11					
YNa0d11					
YNa0yn0					
1a010					

详见GB1094.1—1996标准附录D。

目前,联结组的测量方法很多,最广泛采用的方法有直流法、双电压表法、相位表法、示波器法、匝比仪法等。对于不同场合和试验条件,可选一种方法来试验。现简介如下。

第二节 直 流 法

这是最原始、最简便的方法。现在一般不用,只要知道而已。小型产品的试验,在检修现场的试验多采用此种方法。因为不需要贵重仪器,只需一只1.5V干电池、一块直流毫安表或毫伏表就可以测试了。

1 单相变压器的联结组试验

如图4-1所示,在高压侧接一电池,低压侧接一直流毫安表。电池的“+”极,电流表的“+”端接在

绕组的起端。试验时先接好电流表,然后再合电源。根据电磁感应原理,当一次合上电源时,二次就产生感应电势。若电流表指针向正方向偏转,则说明两绕组绕向及标志是相同的,联结组为II0;若电流表指针向反方向偏转,则为II6。测好后,应先断电流表连线,后断开电源。如果先断电源,由于反电势作用,电流表指针就会突然向反方向打,易把表针打弯。

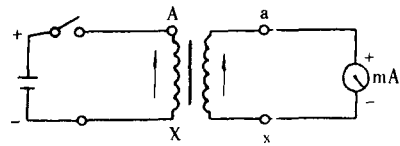


图4-1 单相变压器的极性试验线路图

2 三相变压器Yy联结组试验

以AB供电为例,Yy0联结的试验线路见图4-2(图中箭头为电压方向)及表4-3。

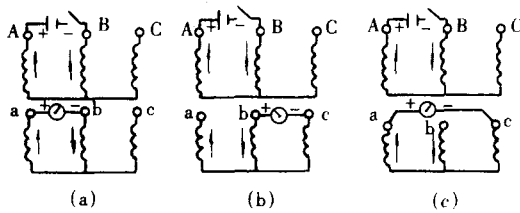


图4-2 Yy0联结的试验线路图

表 4-3 Yy0 联结的试验

组别	通电相	低压侧电流表指示			
		+	-	+	-
Yy0	A B	+	-	-	+
	B C	-	+	+	-
	C A	-	-	+	+

3 三相变压器Yd联结组试验

以AB供电为例,Yd11联结的试验见图4-3(图中箭头为电压方向)及表4-4。

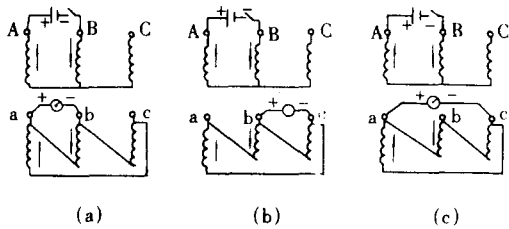


图4-3 Yd11联结的试验线路图

表 4-4 Yd11 联结的试验

组别	通电相	低压侧电流表指示			
		+	-	+	-
Yd11	A B	+	0	-	+
	B C	-	+	0	-
	C A	0	-	+	+

直流法十分简便,最适用于单相变压器联结组测试,但对三相变压器联结组测试不够明晰。它要求操作者必须熟悉接线图,才能正确判断。所以对制造厂来说不宜采用此法,但此方法对检修现场还是可用的。

第三节 交流法

变压器制造过程中和现场安装交接试验时,通常都是采用交流电压来检定变压器(特别是三相变压器)的联结组标号。

JB/T501—1991《电力变压器试验导则》中推荐采用电压比电桥法、双电压表法和光线示波器法三种方法来检定变压器的联结组标号。

1 电压比电桥法

电压比电桥在测定变压器一对绕组间电压比的同时,具有检定这一对绕组的联结组标号的功能。按电桥正常接线时,它可以检定单相变压器II0和II6两种联结组标号。三相变压器Yy0(Dd0)、Yy6(Dd6)、Yd11和Yd5四种联结组标号。当被试三相变压器被试一对绕组的联结组标号与电桥内设定的以上四种联结组标号不同时,只要适当地改变试品与电桥间的连线相序(相别),同样可以利用电桥设定的四种标号来检定其他八种联结组标号。以Yd1及Yy10为例,其原理如下:

【例1】Yd1变成Yd11

当高、低压绕组绕向相同,起末端标记相同,高压绕组末端(X、Y、Z)相连成Y(星形)联结的中性点。而低压绕组a与y、b与z、c与x相连时(右行接线),则联结组标号为Yd11;如果高压绕组不变,低压绕组为a与z、b与x、c与y相连(左行接线),则联结组标号变为Yd1。图4-4为这两种联结组标号的绕组间的接线图和电压相量关系图。

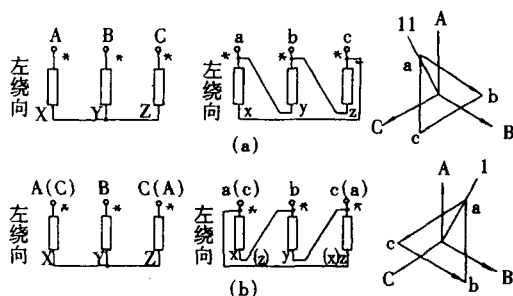


图4-4 绕组接线图和电压相量关系图

(a)Yd11联结组 (b)Yd1联结组

如果把图4-4(b)中高、低压绕组出线端A和C及a和c二相相序标记同时互换(如括号中所示)成反相序(与图4-4(a)相反),低压绕组三角形间连接变成与图4-4(a)中相同的(a)与y、b与(z),(c)与(x),从而联结组由Yd1变成Yd11。以改变后的相别与电压比电桥进线的同名相相连接,利用电桥联结组开关Yd11档即可检定Yd1联结组标号的变压器。

【例2】YNyn10变成YNyn6

高压绕组为左绕向,低压绕组为右绕向,起末端标记相同,连接成如图4-5所示。

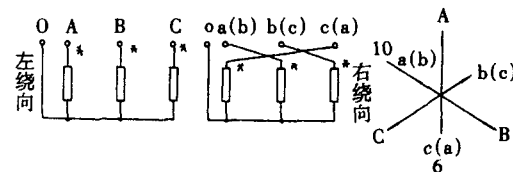


图4-5 绕组YNyn10接线图和电压相量关系图

将图中低压绕组的出线端a改为(b),b改为(c),c改为(a),从而联结组别由YNyn10变成YNyn6,以改变后的相与电桥进线的同名相相连接,利用电桥联结组开关Yy6挡即可检定Yy10联结组别的变压器。

其他各种联结组标号的变换方法见表4-5。

2 双电压表法

当做电压比试验的仪器设备无检定联结组标号功能或被试变压器被试一对绕组中有Z形(曲折星形)连接的接线时,采用双电压

表 4-5 电压比电桥法联结组标号试验

产品联结组标号	产品与电桥的连接	电桥组别开关位置	产品联结组标号	产品与电桥的连接	电桥组别开关位置
Yd1 Dy1	A-C _Q a-c _q B-B _Q b-b _q C-A _Q c-a _q	11	Yd7 Dy7	A-C _Q a-c _q B-B _Q b-b _q C-A _Q c-a _q	5
Yy2 Dd2	A-A _Q a-c _q B-B _Q b-a _q C-C _Q c-b _q	6	Yy8 Dd8	A-A _Q a-b _q B-B _Q b-c _q C-C _Q c-a _q	0
Yd3 Dy3	A-A _Q a-b _q B-B _Q b-c _q C-C _Q c-a _q	11	Yd9 Dy9	A-A _Q a-c _q B-B _Q b-a _q C-C _Q c-b _q	5
Yy4 Dd4	A-A _Q a-b _q B-B _Q b-c _q C-C _Q c-a _q	0	Yy10 Dd10	A-A _Q a-b _q B-B _Q b-c _q C-C _Q c-a _q	6
Yd5 Dy5	A-A _Q a-a _q B-B _Q b-b _q C-C _Q c-c _q	5	Yd11 Dy11	A-A _Q a-a _q B-B _Q b-b _q C-C _Q c-c _q	11
Dd6 Yy6	A-C _Q a-a _q B-B _Q b-b _q C-A _Q c-c _q	6	Yy0 Dd0	A-A _Q a-a _q B-B _Q b-b _q C-C _Q c-c _q	0

注:表中A、B、C分别表示产品高压侧的三相线端;a、b、c分别表示产品低压侧的三相线端;A_Q、B_Q、C_Q分别表示电桥高压侧的端子;a_q、b_q、c_q分别表示电桥低压侧的端子。

表法是一种比较简便的方法。

按图4-6原理图接线: A—*a*用导线相连, 从被试变压器高压侧输入一单相电压(单相变压器)或三相平衡电压(三相变压器)。为了计算方便, 通常输入100V或200V电压。然后用一块电压表测量高压输入电压且保持平稳不变, 用另一块电压表测量X—*x*或B—*b*、B—*c*、C—*c*、C—*b*间的电压。不论绕组是什么接法和联结组标号为0~11间任一组别, 测得电压 $U_{Bb}=U_{Cc}$ 与其他两个电压 U_{Bc} 、 U_{Cb} 三者间的大小关系随不同联结组别电压间相量关系而变化。

图4-6(a)中, 如果 $V_2 < V_1$, 则联结组标号为II0; 如 $V_2 > V_1$, 则联结组标号为II6。

图4-6(b)以联结组标号Yy0、Yd11和Yd5为例。

【例3】Yy0

$$\text{电压比 } K_N = \frac{U_{AB}}{U_{ab}} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$U_{AB} = U_1 = K_N U_{ab} = K_N U_2$$

由图4-7可知:

$$U_{Bb} = U_{AB} - U_{ab} = U_1 - U_2 = U_2 (K_N - 1)$$

$$U_{Cc} = U_{AC} - U_{ac} = U_1 - U_2 = U_2 (K_N - 1)$$

$$\text{得 } U_{Bb} = U_{Cc} = U_2 (K_N - 1) = M$$

$$\begin{aligned} U_{Bc} &= \sqrt{(U_{AB} - U_{ac} \cos 60^\circ)^2 + U_{ac}^2 \sin^2 60^\circ} = \sqrt{(U_{AB} - \frac{1}{2} U_{ac})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2} U_{ac})^2} = \sqrt{(U_1 - \frac{1}{2} U_2)^2 + \frac{3}{4} U_2^2} \\ &= \sqrt{(K_N U_2 - \frac{1}{2} U_2)^2 + \frac{3}{4} U_2^2} = U_2 \sqrt{K_N^2 - K_N + 1} = U_2 \sqrt{1 - K_N + K_N^2} = N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{Cb} &= \sqrt{(U_{AC} - U_{ab} \cos 60^\circ)^2 + (U_{ab} \sin 60^\circ)^2} = \sqrt{(U_{AC} - \frac{1}{2} U_{ab})^2 + (\frac{\sqrt{3}}{2} U_{ab})^2} = \sqrt{(U_1 - \frac{1}{2} U_2)^2 + \frac{3}{4} U_2^2} \\ &= \sqrt{(K_N U_2 - \frac{1}{2} U_2)^2 + \frac{3}{4} U_2^2} = U_2 \sqrt{K_N^2 - K_N + 1} = U_2 \sqrt{1 - K_N + K_N^2} = N \end{aligned}$$

【例4】Yd11

图4-8是A与*a*相连接后, Yd11联结组高、低压绕组电压相量关系图。高、低压绕组线电压三角形ABC和*abc*为等边三角形, 因此AB垂直二等分*bc*, AK垂直二等分BC。得:

$$\begin{aligned} U_{Bb} &= U_{Bc} = U_{Cc} \\ &= \sqrt{(U_{AB} - U_{ab} \sin 60^\circ)^2 + (U_{ab} \cos 60^\circ)^2} \\ &= \sqrt{(K_N U_2 - (\frac{\sqrt{3}}{2} U_2))^2 + (\frac{1}{2} U_2)^2} \\ &= U_2 \sqrt{K_N^2 - \sqrt{3} K_N + 1} \\ &= U_2 \sqrt{1 - \sqrt{3} K_N + K_N^2} = Q \end{aligned}$$

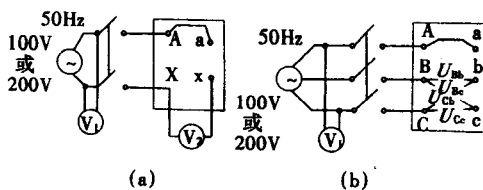


图4-6 双电压表法测量联结组标号原理接线图

(a)单相 (b)三相

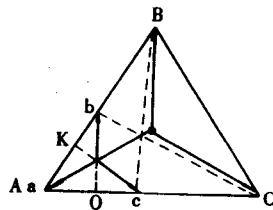


图4-7 联结组标号为Yy0的电压间相量关系图

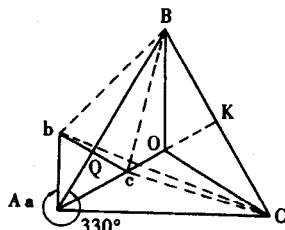


图4-8 联结组标号为Yd11的电压间相量关系图

$$U_{Cb} = \sqrt{U_{Ac}^2 + U_{ab}^2} = \sqrt{(K_N U_2)^2 + U_2^2}$$

$$= U_2 \sqrt{1 + K_N^2} = P$$

【例5】Yd5

图4-9是A与a相连接后，Yd5联结组高、低压绕组电压相量关系图。高、低压绕组电压三角形ABC和abc为等边三角形，因此BK为bc边的垂直二等分线，cQ为BC边的垂直二等分线。得：

$$U_{Bb} = U_{Bc} = U_{Ca} = \sqrt{(U_{AB} + U_{ab} \sin 60^\circ)^2 + (U_{ab} \cos 60^\circ)^2}$$

$$= \sqrt{(K_N U_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} U_2)^2 + (\frac{1}{2} U_2)^2}$$

$$= U_2 \sqrt{K_N^2 + \sqrt{3} K_N + 1} = U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3} K_N + K_N^2} = R$$

$$U_{Cb} = \sqrt{U_{Ac}^2 + U_{ab}^2} = \sqrt{(K_N U_2)^2 + U_2^2} = U_2 \sqrt{1 + K_N^2} = P$$

由上述三个例子求得五个公式M、N、Q、P、R，在其他联结组标号时还可求得两个公式L和T，共为七个公式如下：

$$M = U_2 (K_N - 1)$$

$$N = U_2 \sqrt{1 - K_N + K_N^2}$$

$$P = U_2 \sqrt{1 + K_N^2}$$

$$Q = U_2 \sqrt{1 - \sqrt{3} K_N + K_N^2}$$

$$R = U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3} K_N + K_N^2}$$

$$L = U_2 \sqrt{1 + K_N + K_N^2}$$

$$T = U_2 (1 + K_N)$$

式中， U_2 是被试变压器的低压侧额定线电压。但实际试验时，高压侧只输入100V或200V电压，因此实际计算时应该用实际测得的二次线电压 U_2' 代入上述七个公式。

试验中 U_{Bb} 、 (U_{Ca}) 、 U_{Bc} 、 U_{Cb} 的实测结果必然与七个公式中的两个或三个公式计算结果相符，对照表4-6即可查得被试一对绕组的联结组标号。

3 示波器(拍摄波形)法

当被试变压器联结组标号不是0~11组别时，电压比电桥法和双电压表法都无法检定被试一对绕组间电压相量关系。例如三相变多相高、低压绕组间电压相量相差7.5°、10°、15°的整流变压器。此时需采用示波器拍摄波形，由波形图来判定二绕组间的电压相量角度。

此法通常采用光线示波器较为方便。从被试变压器被试一对绕组电压高的一侧输入三相对称平衡电源，将高、低压侧线电压对应分组引入分压箱(AB对应ab、BC对应bc、AC对应ac)。利用分压箱调节示波器显示波形的幅值(Y轴)，调节示波器走纸速度来调节波形宽度(X轴)，使波形达到能正确分辨高、低压绕组波形及二波形之间的相位差。至少应拍摄三组对应线电压中任意二组电压的波形，二组波形及高、低压绕组间的相位差应相同。

图4-10为一组线电压的波形图。图中高、低压绕组电压过零时，两零点之间的距离电角度之差

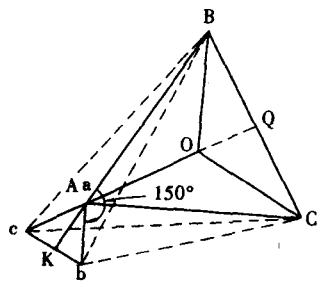


图4-9 联结组标号为Yd5的电压间相量关系图

表 4-6 二电压表法测量变压器联结组对照表

钟 时 序	电压相 角位移 /(°)	绕组 接法	线电压 的相量图	U_{Bb} 或 U_{Xx}	U_{Cb}	U_{Bc}	钟 时 序	电压相 角位移 /(°)	绕组 接法	线电压 的相量图	U_{Bb} 或 U_{Xx}	U_{Cb}	U_{Bc}
0	0	Y/y D/d,I/I D/z		M	N	N	6	180	Y/y D/d,I/I D/z		T	L	L
1	30	Y/d D/y Y/z		Q	Q	P	7	210	Y/d D/y Y/z		R	R	P
2	60	Y/y D/d Y/z		N	M	L	8	240	Y/y D/d D/z		L	T	N
3	90	Y/d D/y Y/z		P	Q	R	9	270	Y/d D/y Y/z		P	R	Q
4	120	Y/y D/d Y/z		L	N	T	10	300	Y/y D/d D/z		N	L	M
5	150	Y/d D/y Y/z		R	P	R	11	330	Y/d D/y Y/z		Q	P	Q

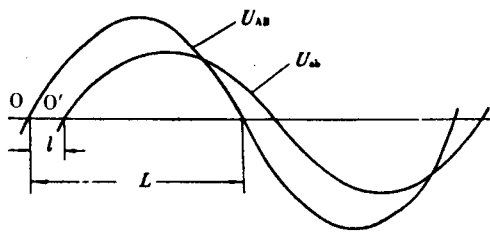


图4-10 示波器拍摄的波形图

$$\frac{l}{L} \times 180^\circ = \text{相位差角度}$$

即为二绕组电压间的相位差。图O'在O的右侧为 U_{ab} 滞后于 U_{AB} , O'在O左侧则 U_{ab} 超前 U_{AB} 。

第五章 绝缘电阻和介质损耗因数测量

第一节 概 述

变压器绕组对地绝缘电阻和绝缘系统电容的介质损耗因数测量习惯上称为绝缘特性试验,以下仍简称为绝缘特性试验。

变压器的绝缘性能除了要满足在额定电压下能安全可靠运行之外,还必须能够承受由于雷电过电压、操作过电压和短路故障过电压等对变压器绝缘造成的侵袭。为了保证变压器的绝缘性能满足上述要求,变压器出厂前要进行必要的绝缘特性试验和绝缘强度试验。以下介绍变压器的绝缘特性试验。

绝缘特性试验的目的是对变压器生产过程中的工艺处理质量和制造质量进行监督。该项试验可间接鉴别变压器绝缘在高电压(绝缘试验电压)作用下的可靠性,并可验证变压器真空处理的好坏和受潮、脏污的影响,以便及时发现变压器绝缘的局部缺陷。

绝缘特性试验使用直流和交流电压在总装配完工并经规定的工艺处理后的变压器本体上进行。绝缘特性试验项目有:绝缘电阻、吸收比和极化指数试验,介质损耗因数试验,变压器油试验,局部放电试验。现仅介绍前两项试验,后两项试验将另作介绍。

第二节 试验标准及规定

1 试验标准

试验依据的国家标准有GB1094.1—1996《电力变压器 第一部分 总则》、GB/T6451—1999《三相油浸电力变压器技术参数和要求》(6~330kV);GB/T16274—1996《油浸式电力变压器技术参数和要求500kV》;JB/T501—91《电力变压器试验导则》。

2 试验项目及限值规定

根据不同的电压等级,标准规定了不同的试验项目,其中有的试验项目有考核(限值)指标,有的试验项目无考核(限值)指标,各厂可根据本厂的工艺和经验加以控制和掌握。

2.1 试验项目

标准规定的试验项目见表5-1。

2.2 限值规定

2.2.1 绝缘电阻

对于4 000kVA以下、35kV及以下的产品,标准要求提供绝缘电阻值,但没有规定最低限值。根据某些制造厂的经验,一般应不低于图5-1中所给出的限值。

2.2.2 吸收比

对于4 000kVA及以上、35kV及以上的产品,国家标准要求提供吸收比的数值,但没有规定最低限值。根据某些制造厂的经验,

表5-1 6~500kV产品绝缘特性试验项目

电压等级 /kV	容量 /kVA	绝缘电阻 /MΩ	吸收比 R_{60}/R_{15}	极化指数 R_{10min}/R_{1min}	$\tan\delta$ /%
6、10	6 300及以下	√			
35	<4 000	√			
	≥4 000	√	√		
	≥8 000	√	√		√
63	63 000及以下	√	√		√
110	120 000及以下	√	√		√
220	360 000及以下	√	√		√
330	360 000及以下		√	√	√
500	720 000及以下		√	√	√

35kV级产品的吸收比应不低于1.30;63kV及以上的产品,吸收比应不低于1.50。

2.2.3 极化指数

对于330kV及以上电压等级,标准规定应测量产品的极化指数。根据经验,此类产品的极化指数一般均在2.5以上。

2.2.4 介质损耗因数($\tan\delta$)

对于8 000kVA及以上、35kV及以上的产品,国家标准要求提供介质损耗因数($\tan\delta$)的数值,其中330~500kV级产品,标准规定20~25℃时的 $\tan\delta\%$ 不大于0.5%;220kV及以下的产品,国家标准没有规定最低限值。JB/T501—91标准规定,对于35kV级及以下的绕组20℃时 $\tan\delta\%$ 应不大于2%;63kV级及以上的绕组20℃时 $\tan\delta\%$ 应不大于1.5%。

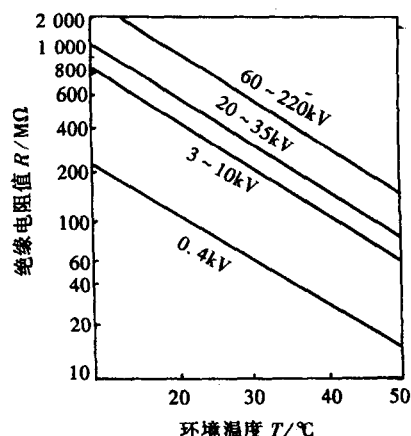


图5-1 绝缘电阻最低限值

第三节 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验

1 试验原理

1.1 直流电压作用下绝缘内部的电流变化

变压器的绝缘电阻是表征变压器高压对低压及地、低压对高压及地、高压和低压对地等绝缘结构在直流电压作用下的绝缘特性。它与上述绝缘结构在直流电压作用下所产生的充电电流、吸收电流和泄漏电流有关。变压器的绝缘结构及产生这三种电流的等效电路见图5-2。

充电电流是当直流电压加到被试品上时,对绝缘结构的几何电容进行充电形成的电流,其值决定于两极之间的几何尺寸大小和结构形式,并随施加电压的时间衰减很快。当去掉直流电压时电路中就会产生与充电电流极性相反的放电电流。

吸收电流是当直流电压加到被试品上时,绝缘介质的原子核与电子电荷的中心产生偏移,从而使偶极子缓慢转动并调整其排列方向而产生的电流,这一电流随施加电压的时间衰减较慢。

泄漏电流是当直流电压加到被试品上时,绝缘内部或表面移动的带电粒子、离子和自由电子形成的电流,这一电流与施加电压的时间无关,而只决定于施加的直流电压的大小。

总电流为上述三种电流的合成电流。几种电流的时间特性曲线见图5-3。

1.2 试验原理

变压器的绝缘电阻是表征在同一直流电压下,不同加压时间所呈现的绝缘特性变化。绝缘电阻的变化决定于电流*i*的变化,它直接与施加直流电压的时间

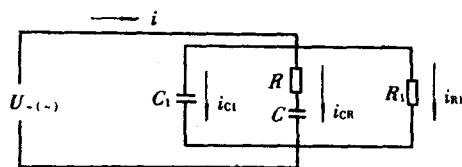


图5-2 绝缘介质的等效电路

$U_{(-)}$ —外施直流(交流)电压 C_1 —等值几何电容
 C, R —表征不均匀程度和脏污等的等值电容、电阻
 R_1 —绝缘电阻 i_{C1} —充电电流 i_{CR} —吸收电流
 i_{R1} —泄漏电流 i —总电流

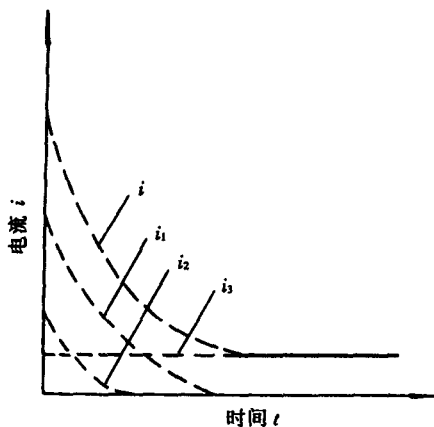


图5-3 直流电压作用下绝缘介质中的等值电流

i —总电流 i_1 —吸收电流 i_2 —充电电流
 i_3 —泄漏电流

有关,一般均统一规定绝缘电阻的测定时间为一分钟。

对于中小型变压器的绝缘电阻,一分钟就可基本稳定;对于大型变压器的绝缘电阻,则需要较长的时间才能稳定。产品不同,绝缘电阻随时间的变化曲线也不同,但曲线形状大致相同(见图5-4)。一分钟的绝缘电阻值在 $R_{\infty}=f(t)$ 曲线中的位置也不同;即使是同一种产品,其一分钟的绝缘电阻值在上述曲线中的位置也不完全相同,即同一种产品,其绝缘电阻时间曲线也不完全相同。因此,无法比较产品绝缘特性的好坏。对于4 000kVA/35kV及以上的产品,我们采用吸收比来表示产品的绝缘特性。

对于330kV及以上特大型变压器的绝缘电阻,其稳定时间需要更长。因此,采用吸收比来考核特大型变压器的绝缘特性,从近期一些工厂的试验结果和现场安装试验结果来看,均发现存在不少问题。而采用极化指数这一指标来表征产品的绝缘特性,可消除因吸收比测试时间短所带来的判断绝缘状况的不确定性,比吸收比更科学、更准确。

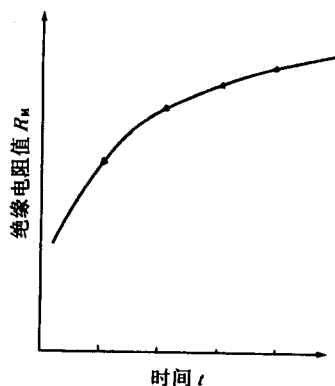


图5-4 绝缘电阻与时间曲线

2 试验方法

2.1 试验条件和要求

由于变压器的绝缘电阻与施加电压的大小、加压时间的长短和绝缘的温度有关,所以,应根据不同的产品选择不同的摇表或绝缘测定器。对于只要求测定绝缘电阻的产品,一般使用2 500V、10 000M Ω 量程的摇表;对于要求测定吸收比或极化指数的产品,则需要使用5 000V、10 000M Ω 量程的绝缘测定器,如ZC-48型。对于摇表和绝缘测定器的准确度的选择,在1990年以前生产的按允许误差标注的,应选1.5级;1990年以后,国家标准修改为按允许示值误差标注,应选1.0级。另外,绝缘电阻试验时要同时记录仪表读数、试验时间和变压器油的温度,决不允许随意估计这三个数据。

按GB/T6451—1999标准规定,试验报告要给出绝缘特性试验时的变压器油温、实测绝缘电阻值、吸收比值和极化指数值。绝缘电阻值可以按照下述公式换算。

$$R_2 = R_1 \cdot 1.5^{(t_1 - t_2)/10} \quad (5-1)$$

式中 R_2 ——油温为 t_2 时的绝缘电阻,M Ω ;

R_1 ——油温为 t_1 时的绝缘电阻,M Ω 。

2.2 操作方法和试验部位

2.2.1 操作方法

(1)检查摇表或绝缘测定器测量线的绝缘是否良好。检查方法是将摇表或绝缘测定器的接地端子与地线相连,火线端子与测量线一端相连,测量线另一端悬空,接通绝缘测定器的输出开关(或摇动摇表至额定转速)。此时,测量线的绝缘电阻接近无限大。之后,断开绝缘测定器的输出开关,取下测量线。

(2)将被试变压器高、中、低各绕组的所有端子分别用导线短接,并将测量线的一端与被试绕组相连,其他绕组与铁心、油箱相连后接地,测量线的另一端先与地线相连进行放电,然后断开。

(3)接通绝缘测定器的输出开关(或摇动摇表至额定转速),将测量线迅速与绝缘测定器(或摇表)火线端相接触,同时记录接通的时间。

(4)当接通火线端的时间达到15s时,立即读取绝缘测定器(或摇表)的指示值;至60s时再读取一个值。如需要测量极化指数时,则应继续延长试验时间至10min,并应每隔一分钟读取一个值。

(5)测量结束后,从火线端取下测量线,断开绝缘测定器的输出开关,并将测量线与地线相连进行放电。

(6)改变被试绕组,按顺序b~f重新进行试验。

2.2.2 测量部位

对于双绕组变压器,应分别测量高压绕组对低压绕组、铁心和油箱,低压绕组对高压绕组、铁心和油箱,高、低压绕组对铁心和油箱。

对于三绕组变压器,应分别测量高压绕组对中、低压绕组、铁心和油箱,中压绕组对高、低压绕组、铁心和油箱,低压绕组对高、中压绕组、铁心和油箱,高、中压绕组对低压绕组、铁心和油箱,高、低压绕组对中压绕组、铁心和油箱,中、低压绕组对高压绕组、铁心和油箱,高、中、低压绕组对铁心和油箱。

3 试验结果分析

3.1 绝缘电阻与施加电压时间的关系

根据表5-2几种典型产品绝缘电阻的测量结果分析,不同容量、不同电压等级的变压器的绝缘电阻随加压时间变化的趋势一般是60s之前随加压时间上升很快,60s到120s上升也很快,120s之后上升速度逐渐减慢。从绝对值来看,产品容量越大,电压等级越高,尤其是220kV级及以上电压等级的产品,60s之前的绝缘电阻值越小,60s之后的稳定时间越长,一般均要8min以后才能基本稳定。由此可见,220kV及以上电压等级的产品应该测量产品的极化指数。

表5-2 绝缘电阻测量结果

产品规格 kVA/kV	绝缘电阻/MΩ(每隔60s测一次)										
	15s	60s	2×60s	3×60s	4×60s	5×60s	6×60s	7×60s	8×60s	9×60s	10×60s
2 000/38.5(18℃)	2 200	3 000	3 700	4 200	4 500	4 900					
4 000/60(21℃)	2 300	3 600	4 700	5 200	6 000	6 200					
20 000/63(25℃)	760	1 510	2 000	2 300	2 500	2 600					
31 500/110(23℃)	850	1 620	2 300	2 500	2 700	2 800					
360 000/220(38℃)	700	1 500	2 300	2 800	3 000	3 200	3 500	3 900	3 900	3 900	4 000
370 000/220(22℃)	2 000	3 500	5 000	7 000	7 500	8 000	9 000	10 000	11 000	12 000	12 000
150 000/330(32℃)	1 300	2 000	2 700	3 000	3 500	3 700	3 900	3 900	4 000	4 000	4 000
120 000/500(28℃)	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	9 000	9 000	9 000
210 000/500(32℃)	1 800	3 500	4 200	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000	10 000	10 000
300 000/500(31℃)	1 600	3 000	3 900	4 700	5 500	6 100	6 700	7 300	7 800	8 300	8 700

3.2 吸收比和极化指数与温度的关系

根据某工厂几种典型产品吸收比和极化指数的测量结果(见表5-3)分析,110kV及以下产品的吸收比,当变压器的温度不超过30℃时,吸收比随温度的上升而增大,约30℃左右吸收比达到一最大极限值,超过30℃时吸收比则从最大极限值开始下降;220kV、500kV产品的吸收比和极化指数达到最大极限值的温度则为40℃左右。

3.3 影响绝缘电阻的其他因素

在第五章第三节3.1、3.2中分析了施加电压的时间和测量时变压器的温度对绝缘电阻的影响。在施加电压的大小、时间和变压器温度相同的情况下,绝缘电阻还与下列因素有关:

(1)与变压器绝缘干燥的工艺和质量有关。干燥不良,则吸收比降低。

(2)与变压器的清洁度和受潮程度有关。如绝缘有局部受潮,则吸收比亦降低。

(3) 与变压器的容量和电压等级有关。在变压器容量相同的情况下,吸收比随电压等级的升高而升高,这是因为电压等级越高,绝缘距离越大的缘故。在变压器电压等级相同的情况下,吸收比随容量的增大而降低,这是因为容量越大,等效电容的极板面积越大,在电阻系数不变的情况下,绝缘电阻必然降低。

第四节 自动绝缘测试仪

为了测量变压器、电机、电缆、开关等各种电气设备及绝缘材料的绝缘电阻、吸收比和极化指数,国内外开发出了多种自动绝缘测试仪(亦称为绝缘分析仪)。自动绝缘测试仪的开发生产是电子技术与微处理器技术发展的成果,它使变压器绝缘电阻、吸收比和极化指数的测量实现了自动化,简化了操作,节省了人力,同时还提高了测量的准确度。

1 基本工作原理

自动绝缘测试仪广泛采用电压电流法作为基本测试方法,其原理如图5-5所示。

图5-5中,在一个测试电源上串接被测电阻和标准采样电阻组成闭合回路。图中被测电阻与标准采样电阻及电压、电流关系为:

$$V=i_xR_x+V_s$$

其中, $i_x=\frac{V_s}{R_s}$

故被测电阻 $R_x=\frac{VR_s}{V_s}-R_s$

当 $R_s\ll R_x$ 时, $R_x\approx\frac{VR_s}{V_s}$

可见,当HVP电压V恒定时,采样电阻 R_s 上的电压降 V_s 与被测电阻值成反比。被测电阻值等于某一确定的电路转换系数除以标准采样电阻上的电压 V_s 。这样,采用高稳定的直流测试电源和高输入阻抗电压表,即可获得较高的测量准确度。

自动绝缘测试仪由2 500V/5 000V直流高压发生器、直流采样电压放大、A/D变换器(或电压/频率变换器)、自动量程转换、数据存储和显示、计时和音响报时、工作状态控制和保护电路等部分组成。在测试高电压作用下,回路电流流经被测电阻和采样电阻,并在采样电阻两端产生与被测电阻值成反比的电压降。该电压经高倍数直流放大后,送到A/D变换器变成数字信号。该信号经数据处理后,采样电阻上的电压值转换为与之成反比的被测电阻值,并被存储和显示数据。

表5-3 吸收比和极化指数测量结果

产品规格	项目	测量数据						
1 600kVA 60kV	温度/℃	20.2	22.5	24.5	29.5	34		
	吸收比	1.36	1.43	1.57	1.57	1.48		
4 000kVA 60kV	温度/℃	21	23	28	31			
	吸收比	1.57	1.52	1.69	1.59			
31 500kVA 110kV	温度/℃	20.7	22.5	25.4	27.2	30.5	32	33.5
	吸收比	1.60	1.63	1.67	1.76	1.89	1.79	1.76
31 500kVA 110kV	温度/℃	17.2	19.5	22.5	27.5	30.5	41	
	吸收比	1.74	1.86	1.90	2.00	2.10	1.79	
360 000kVA 220kV	温度/℃	14	31	38	47.5			
	吸收比	1.25	1.42	1.53	1.50			
	极化指数	3.18	3.11	3.28	2.19			
167 000kVA 500kV	温度/℃	17.5	30.5	40	50			
	吸收比	1.13	1.28	1.42	1.53			
	极化指数	2.5	2.65	2.97	2.54			

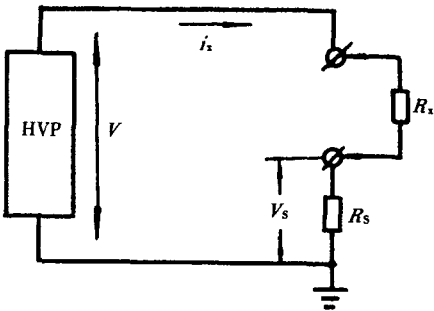


图5-5 电压电流法基本原理
HVP—2 500V/5 000V直流高压发生器
 R_s —标准采样电阻 R_x —被测电阻
 i_x —测量回路电流 V_s —标准采样电阻上电压降

自动绝缘测试仪采用微处理器为核心器件。整机工作的控制信号均由微处理器产生并输出到各部分电路,分别控制输入取样控制电路、输出显示电路、计时电路,完成数据显示、计时、报警功能,并给出测试高压选择信号、高压启动信号和自动量程转换控制信号。软件上采用了先进的数字处理技术,对数据进行计算、处理,使输出数据的准确度、稳定性都得到了很大提高。整机在微处理器控制下,自动进行 R_{15s} 、 R_{60s} 、 R_{10min} 的测量,并计算出吸收比(R_{60s}/R_{15s})和极化指数(R_{10min}/R_{1min}),自动完成变压器绝缘电阻试验的全部测量工作。有的测试仪还安装了微型打印机,可打印出测试结果。

2 自动绝缘测试仪的性能特点

自动绝缘测试仪与摇表及其他兆欧表相比有其独特的优越性能。

(1)自动化程度高。可自动测量 R_{15s} 、 R_{60s} 、 R_{10min} 、吸收比(R_{60s}/R_{15s})和极化指数(R_{10min}/R_{1min})。

(2)可存储测量结果。有的自动绝缘测试仪可存储多达25组的测量结果。

(3)测量准确度高。基本准确度仅为 $\pm 5\%$,而一般摇表仅为 $\pm 10\%$ 。

(4)输出短路电流一般大于2mA,可对容性负载快速充电,适合于大容量变压器的绝缘测量。

(5)可显示测试时间。测试高压启动后,每隔15s依次显示时间和被测电阻值。同时,亦可即时显示当前时刻的绝缘电阻值。

(6)由于采用了各种成熟的抗干扰技术措施,抗干扰能力强,可在现场进行绝缘电阻试验。

3 操作方法及注意事项

操作方法和接线与第五章第三节2.2中(1)所述基本一致,所不同的是启动高压以前火线端(L端)不带电,接好线后,启动高压就可自动进行测量。

需要注意的是:在进行高阻测量时,为了消除表面泄漏电流的影响,应使自动绝缘测量仪的屏蔽端接至试品测试端与地之间绝缘物外表的屏蔽层上,否则易造成测量值超差。

4 国内外部分自动绝缘测试仪的主要技术指标

表5-4列出了部分国内外制造的自动绝缘测试仪的主要技术指标。国内产品性价比很高,可优先选用。由于信息有限,只列了一部分适合变压器绝缘电阻测试使用的仪器,仅供参考。

表5-4 国内外部分自动绝缘测试仪的主要技术指标

型号	测试电压 /V	测量范围	基本准确度 /%	输出短路电流 /mA	备注
GZ-8	2 500	10MΩ~200GΩ	$\leq \pm 5$	≥ 2	国产
	5 000				
KD2677	2 500	0~100GΩ	$\leq \pm 5$	≥ 3	国产
	5 000	0~200GΩ			
PM-5A	2 500	1.25MΩ~50GΩ	$\leq \pm 3$	2	进口
	5 000	2.5MΩ~50GΩ	$\leq \pm 5$		
BM25	2 500	0kΩ~2.5TΩ	$\leq \pm 5$	2	进口
	5 000	10kΩ~5TΩ			
1-5 000	2 500	10kΩ~250GΩ	$\leq \pm 5$	2.5	进口
	5 000	10kΩ~500GΩ			

第五节 介质损耗因数(tanδ)试验

1 介质损耗因数的物理意义

绝缘介质在交流电压作用下会在绝缘介质内部产生损耗,这些损耗包括绝缘介质极化产生的损耗、绝缘介质沿面爬电产生的损耗和绝缘介质内部局部放电产生的损耗等。由于绝缘介质内部产生了损耗,所以造成施加在绝缘介质上的交流电压与电流之间的功率因数角不再是90°。我们把功率因数角的余角称为介质损失角,并用介质损耗因数(tanδ)来表示绝缘系统电容的介质损耗特性。

1.1 等效电路及电压、电流相量图

绝缘介质在交流电压作用下产生介质损耗的等效电路见图5-2。其施加电压及介质损耗电流的相量图见图5-6。图5-2和图5-6可进一步简化成图5-7。

1.2 介质损耗因数($\tan\delta$)的表示方法

由图5-7等效电路图和相量图可知,绝缘介质中的损耗可表示为 $W=UI\cos\varphi=UI_R=UI_C\tan\delta$,所以

$$\tan\delta=\frac{I_R}{I_C}。为了便于比较,通常取\tan\delta=\frac{I_R}{I_C}\times100\%,即$$

用 $\tan\delta$ 来表示相对的介质损耗因数的大小。这样可以消除绝缘介质几何尺寸差异造成的影响,便于比较和判定不同结构产品的绝缘性能。

2 $\tan\delta$ 的电压温度特性

2.1 电压特性

$\tan\delta$ 与施加电压的关系决定于绝缘介质的性能、绝缘介质工艺处理的好坏和产品结构。当绝缘介质工艺处理良好时,外施电压与 $\tan\delta$ 之间的关系近似一水平直线,且施加电压上升和下降时测得的 $\tan\delta$ 值是基本重合的。当施加电压达到某一极限值时, $\tan\delta$ 曲线开始向上弯曲,见图5-8曲线1。

如果绝缘介质工艺处理得不好或绝缘介质中残留气泡等,则绝缘介质的 $\tan\delta$ 比良好绝缘时要大。另外,由于工艺处理不好的绝缘介质在极低电压下就会发生局部放电,所以, $\tan\delta$ 曲线就会较早地向上弯曲,且电压上升和下降时测得的 $\tan\delta$ 值是不相重合的,见图5-8曲线2。

当绝缘老化时,绝缘介质的 $\tan\delta$ 反而比良好绝缘时要小,但 $\tan\delta$ 开始增长的电压较低,即 $\tan\delta$ 曲线在较低电压下即向上弯曲,见图5-8曲线3。另外,老化的绝缘比较容易吸潮,一旦吸潮, $\tan\delta$ 就会随着电压的上升迅速增大,且电压上升和下降时测得的 $\tan\delta$ 值不相重合,见图5-8曲线4。

2.2 温度特性

$\tan\delta$ 随温度的上升而增加,其与温度之间的关系与绝缘材料的种类、性能和产品的绝缘结构等有关,在同样材料、同样绝缘结构的情况下与绝缘介质的工艺干燥、吸潮和老化程度有关。

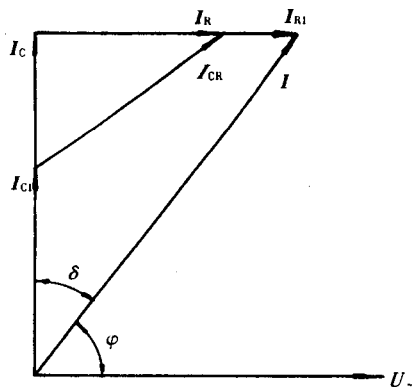


图5-6 绝缘介质等值电流相量图

I_C —吸收电流的无功分量 I_R —吸收电流的有功分量
 φ —功率因数角 δ —介质损失角

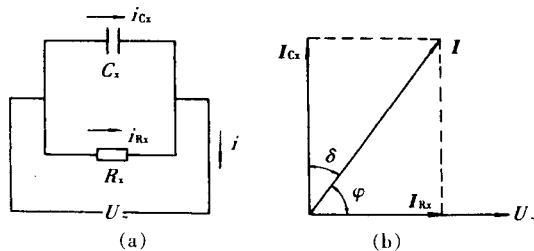


图5-7 绝缘介质简化等效电路和等值电流相量图

(a)等效电路 (b)等值电流相量图

C_s —绝缘介质的总电容 R_s —绝缘介质的总泄漏电阻

I_{Cs} —绝缘介质的总电容电流 I_{Rs} —绝缘介质的总泄漏电流

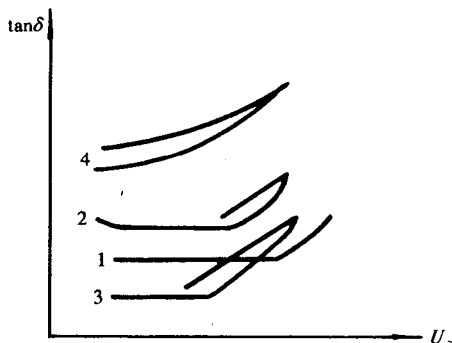


图5-8 绝缘介质 $\tan\delta$ 的电压特性

对于油浸式变压器,在10℃~40℃范围内,干燥产品的 $\tan\delta$ 增长较慢;温度高于40℃,则 $\tan\delta$ 的增长加快,温度特性曲线向上逐渐弯曲。为了比较产品不同温度下的 $\tan\delta$,GB/T6451—1999国家标准规定了不同温度 t 下测量的 $\tan\delta$ 的换算公式。

$$\tan\delta_2 = \tan\delta_1 \cdot 1.3^{(t_1 - t_2)/10} \quad (5-2)$$

式中 $\tan\delta_2$ ——油温为 t_2 时的 $\tan\delta$ 值, %;

$\tan\delta_1$ ——油温为 t_1 时的 $\tan\delta$ 值, %。

3 $\tan\delta$ 测量方法

3.1 测量仪器及测量电压

变压器、互感器等产品的介质损耗因数($\tan\delta$)测量一般均采用高压西林电桥。使用比较多的电桥型号有国产QS1型(变压器 $\tan\delta$ 测量多采用此电桥)和瑞士进口2801型。两种电桥的基本原理是一样的(见图5-9),不同的是2801型电桥的 R_4 可以调节,且主桥外带有一套2911型自动电位调节器,该调节器可以自动消除不利的接地和测量导线局部电容对 $\tan\delta$ 测量的影响。2801型电桥的测量范围和准确度为:使用桥内测量元件和100pF标准电容器时,电容测量范围为0.01pF~11μF,测量准确度为±0.05%; $\tan\delta$ 测量范围为0~350%,测量准确度为±0.5%。

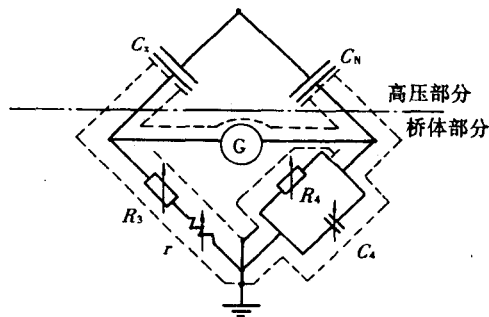


图5-9 高压西林电桥原理线路图

C_x —被测产品等效电容 C_n —标准电容器
 R_3, r, R_4 —可变桥臂电阻 C_4 —可变桥臂电容
 G —5511(5512)电子式零指示器(2801电桥)

还有一类电容和介损测量仪在变压器、互感器等产品的介损 $\tan\delta$ 测量中应用很广。这种测量仪采用矢量电流法测量电容和介质损耗因数。其原理是将 C_x 和 C_n 两个回路电流输入测量仪后,经微处理器进行数字运算,得到电容 C_x 和其介质损耗因数,便于实现自动化测量。典型仪器有进口的2876电桥、2818电容介损测量仪和国产的2518介质损耗测试仪。这类测试仪测量准确度比2801电桥稍低,但实现了全自动测量,操作简单,适合于生产性试验测量。

$\tan\delta$ 测量电压:对于额定电压6kV及以下电压等级的产品(当要求测量 $\tan\delta$ 时),取额定电压;对于额定电压为10kV~35kV电压等级的产品(当要求测量 $\tan\delta$ 时)取10kV;对于额定电压为63kV及以上电压等级的产品取≥10kV,但最高不应超过产品最低电压绕组额定电压的60%。

3.2 正接法测量

西林电桥正接法只能测量两极对地绝缘的产品,如电流互感器、套管等,原理线路图见图5-10。测量方法和步骤如下。

(1)预估试品电容和测量 $\tan\delta$ 电压下的电容电流,并根据试品电容和电容电流的大小选择合适的电桥分流器和桥臂电阻 R_4 (QS1型电桥 R_4 等于 $10\,000/\pi$)。

(2)按图5-10线路接线,并经认真检查无误后,先施加较低电压进行测量,然后再升压至测量电压进行测量。

(3)测量时首先调节电桥的桥臂电阻 R_3 ,使电桥基本达到平衡,然后再调节电桥的桥臂电容 C_4 和桥臂微调电阻 r ,使电桥完全达到平衡。

(4)读取、记录电桥 $R_3(r)$ 和 C_4 测量值,然后根据电桥 R_4 的取值和标准电容器 C_n 的电容值计算试

品的电容和 $\tan\delta\%$ 。

试品电容 C_x 的计算公式为：

$$C_x = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3 + r} \quad (5-3)$$

$$\text{QS1电桥 } C_x = C_N \cdot 3.184 \times \frac{100 + R_3}{n(R_3 + r)}$$

试品 $\tan\delta$ 的计算公式为：

$$\tan\delta = R_4 \omega C_4 \quad (5-4)$$

$$\text{当 } R_4 \text{ 取 } \frac{1000}{\pi} \Omega, C_4 \text{ 取 } \mu\text{F 时, } \tan\delta = 0.1 C_4,$$

$$\tan\delta\% = 10 C_4;$$

$$\text{当 } R_4 \text{ 取 } \frac{10000}{\pi} \Omega, C_4 \text{ 取 } \mu\text{F 时, } \tan\delta = C_4, \tan\delta\% = 100 C_4.$$

3.3 反接法测量

对于变压器来说,由于其油箱是直接落在地面上的,所以测量绕组对地的介质损耗因数($\tan\delta$)不能采用正接法,只能采用反接法,原理线路图见图5-11。

测量方法和步骤同正接法。但由于反接法测量时桥臂电阻 R_3 、 r 、 R_4 和 C_4 均处于高电位,因此,是用绝缘杆把操作元件引到电桥接地盖子上进行操作的(或人站在 $\geq 10\text{kV}$ 绝缘台子上操作),故测量时必须时刻注意安全。

4 几点分析

(1)由于变压器的 $\tan\delta$ 与产品使用的变压器油、绝缘材料的种类和性能以及产品制造工艺有关,所以,不能用一种简单的关系来代表所有的情况。

(2)由于变压器的 $\tan\delta$ 只能用来判断绝缘的整体特性,对判断绝缘的局部缺陷是不灵敏的,所以,此项试验还有一定的局限性。正因为如此,所以,GB1094.1—1996标准只规定有此试验项目,GB/T6451—1999标准只要求提供 $\tan\delta$ 实测数据,而没有规定具体限值(330kV有限值规定)。GB/T16274—1996标准要求提供 $\tan\delta$ 实测数据,而且有具体限值规定。各企业可根据自己的制造工艺等积累这方面的数据和经验,并用以判断不同产品的绝缘处理状况。

(3)尽管用 $\tan\delta$ 来判断变压器的绝缘状况是不灵敏、不准确的,且变压器承受绝缘强度试验的能力与 $\tan\delta$ 的大小没有直接的内在关系,但实际试验证明,如果变压器绝缘干燥处理不良、油纸中含水量较高,则变压器的 $\tan\delta$ 将较大。较大的 $\tan\delta$ 是变压器运行中引起绝缘击穿和绝缘热老化的潜在因素。

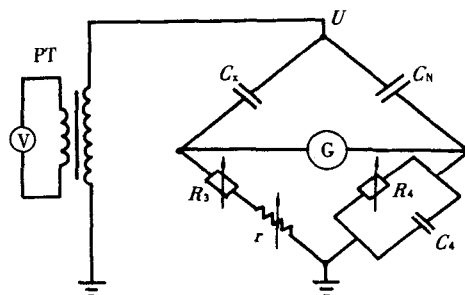


图5-10 正接法测量原理线路图

PT—电压互感器 V—电压表
U— $\tan\delta$ 测量电压

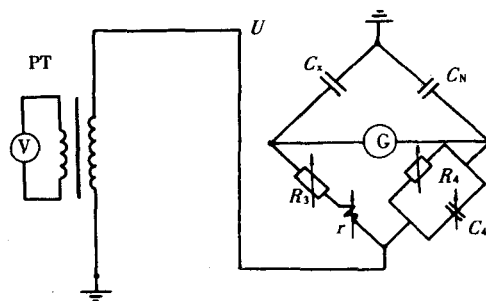


图5-11 反接法测量原理线路图

第六章 空载电流和空载损耗测量

第一节 概 述

变压器的空载电流和空载损耗测量习惯上称为空载试验,以下仍简称为空载试验。变压器的空载试验是从变压器的任意一侧绕组(一般为低压侧绕组)施加额定频率为近似正弦波形的额定电压,其他绕组全部开路,测量变压器的空载损耗和空载电流的试验。变压器空载试验的主要目的是:测量产品的空载损耗和空载电流,看其是否符合产品有关标准和技术条件要求;通过测量产品的空载损耗和空载电流发现铁心磁路中的局部或整体缺陷;根据感应耐压试验和短路试验前后测量的空载损耗比较,判断绕组是否有匝间短路情况。

空载损耗主要是磁通在铁心硅钢片中产生的磁滞损耗和涡流损耗。空载损耗还包括空载电流在励磁绕组上产生的电阻损耗和绝缘介质中产生的损耗。但是,由于后者远小于前者,所以,变压器的空载损耗实际上仅指前者,并习惯上称之为铁损。

空载电流是指在变压器铁心中产生磁通和空载损耗所需的输入励磁绕组的电流。空载电流的无功部分产生磁通,有功部分则产生空载损耗。空载电流还包括各绕组、各部位对地及对相邻绕组、相邻线段、相邻线匝之间的电容电流。空载电流是滞后于施加电压近 90° 的感性电流,此电流是一个含有以3、5、7次谐波为主的高次谐波电流。这一畸变的高次谐波电流进入发电机绕组后,将使发电机的输出电压发生畸变(一般变为波顶因数高于 $\sqrt{2}$ 的尖峰波),并由此导致空载电压也发生畸变。

变压器的空载损耗是施加空载电压和频率的函数。空载损耗和空载电流对施加电压的波形畸变非常敏感。所以,励磁电压波形的畸变将使实测的空载损耗和空载电流与近似正弦波形下的测量结果产生偏差。为了校正由此造成的偏差,GB1094.1—1996国家标准规定了对空载损耗进行波形校正的方法(对空载电流没有规定进行波形校正)。

变压器的空载试验,目前大部分企业仍采用传统的电压表(电压互感器)、电流表(电流互感器)、瓦特表测量系统(以下简称仪表测量系统),一部分企业已采用计算机自动测量系统(以下简称自动测量系统)。试验依据的标准除GB1094、GB/T6451等国家标准外,还有产品的技术条件。

第二节 空载试验方法

1 试验线路

1.1 仪表测量系统

当被试变压器的容量很小且仪表量程许可时,则可采用仪表直接接入电路进行空载试验。此时,电压表应接在靠近负载侧,电流表接在靠近电源侧,瓦特表接在电压表和电流表之间。当被试变压器的励磁电压、电流超过仪表量程时,则应在电路中接入电压和电流互感器。本章仅画出带有电压互感器、电流互感器的试验线路。

对于单相变压器或三相变压器的单相空载试验采用单相试验线路,见图6-1。

对于三相变压器,则采用三相试验线路,其中三相二瓦特表试验线路见图6-2;三相三瓦特表试验线路见图6-3。

1.2 自动测量系统

自动测量系统一般由高压电压互感器、高压电流互感器、精密电压互感器、精密电流互感器（准确度一般高于0.001级及以上）、多通道瞬态记录仪、计算机、打印机、抗干扰电源等组成。其系统框图见图6-4。

自动测量系统的工作原理简述如下：来自发电机、调压器和中间变压器的试验电源通过高压电压互感器和高压电流互感器转换成较低的电压和电流，该电压和电流再经过精密电压互感器、精密电流互感器转换，变成瞬态记录仪可以接受的更低的电压和电流，然后由计算机自动读取记录仪记录的电压、电流和功率等试验数据，并对上述试验数据进行处理、显示、分析、打印报告等。

自动测量系统的控制、测量、记录、试验数据自动处理等均由计算机通过相应的软件系统来完成。其主要软件结构框图见图6-5。

另外也可以采用准确度较高的功率分析仪进行自动测量。

2 试验方法

2.1 仪表测量系统

三相变压器的空载试验可以采用二瓦特表法或三瓦特表法。采用二瓦特表法时，由于三相磁路和三相励磁电压的不对称，将对空载损耗和空载电流的测量

造成一定的误差。为了减小由此引起的测量误差，试验时应依次以三相中的一相做公用线进行三次测量，并取三次测量结果的平均值为实测值。采用三瓦特表法时，虽然三相励磁电压是对称的，但由于三相磁路不对称，所以造成三相电流之间不再是120°的相位关系。

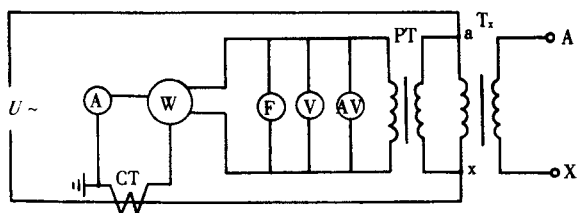


图6-1 单相变压器空载试验线路

T_1 —被试变压器 PT—电压互感器 CT—电流互感器
 U_1 —单相试验电源 W—瓦特表 A—电流表 V—电压表 AV—平均值电压表 F—频率表

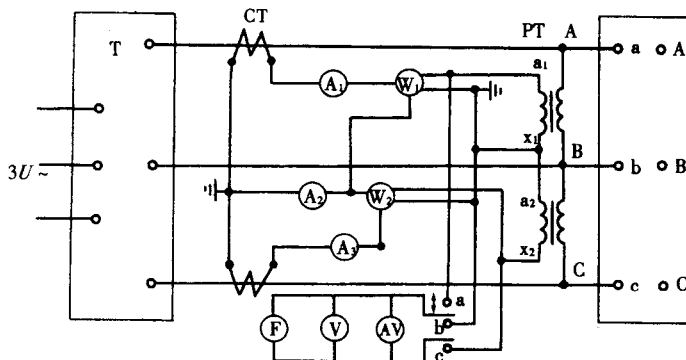


图6-2 三相变压器二瓦特表空载试验线路

T—中间变压器 3U—三相试验电源

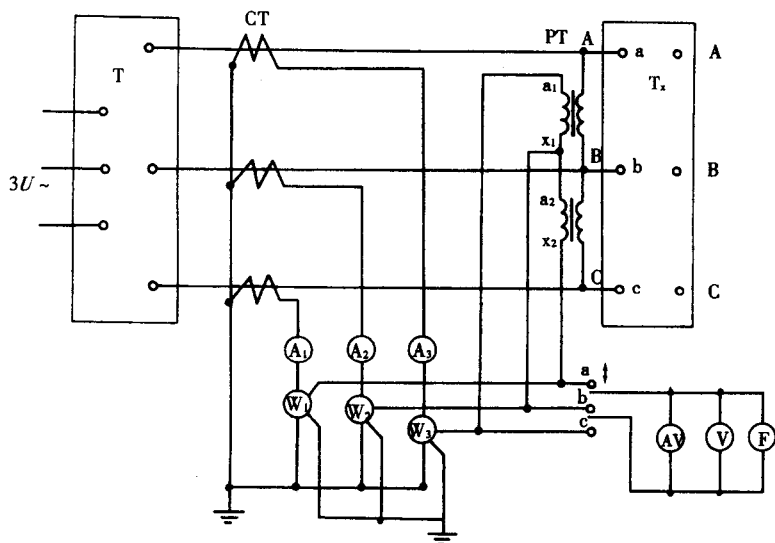


图6-3 三相变压器三瓦特表空载试验线路

对于10kV电压等级的变压器,试验用电压互感器、电流互感器的准确度应保证在0.2级及以上,瓦特表应采用低功率因数瓦特表($\cos\varphi\leq 0.1$)。

对于35kV及以上电压等级的变压器,由于产品的功率因数很小,所以,试验用电压互感器、电流互感器的准确度应保证在0.1级及以上;瓦特表的功率因数应为 $\cos\varphi\leq 0.1$;并应对试验用电压互感器、电流互感器角差对空载损耗造成的影响进行校正。

为了校正励磁电压波形畸变对空载损耗造成的影响,试验时应以平均值电压表(刻度为具有同一平均值的正弦波形的方均根值)为准施加额定电压,同时用一有效值电压表与平均值电压表并联,并按GB1094.1—1996标准规定进行校正。

2.2 自动测量系统

自动测量系统的试验程序如下。

2.2.1 系统启动

首先打开电源开关,然后打开瞬态记录仪和计算机的电源开关,待计算机启动后输入相应的控制和测试程序。

2.2.2 参数设置

在进行测量前,要根据试品参数(标准要求的参数)设置好系统的设备参数、应测量的参数、系统在进行数据处理时所需要的参数、报告的格式参数等。

2.2.3 测量

调整控制和测量程序至标准要求的参数,然后分别测量出三相电压、电流的有效值、平均值和有功功率、无功功率、功率因数、总功率等。

2.2.4 打印报告

根据需要,将测量数据进行处理,并打印出完整的试验报告,之后结束程序。

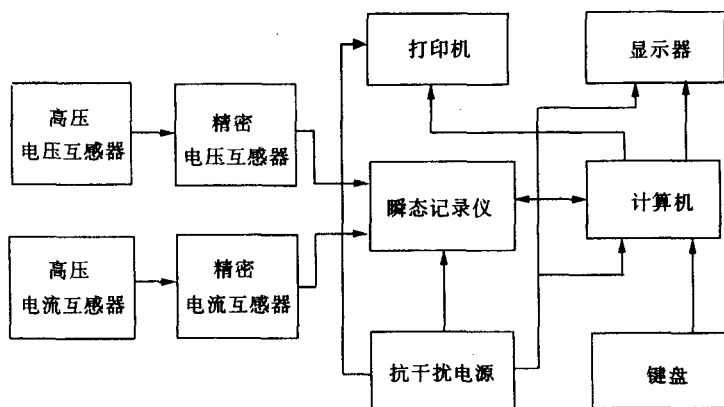


图6-4 自动测量系统框图

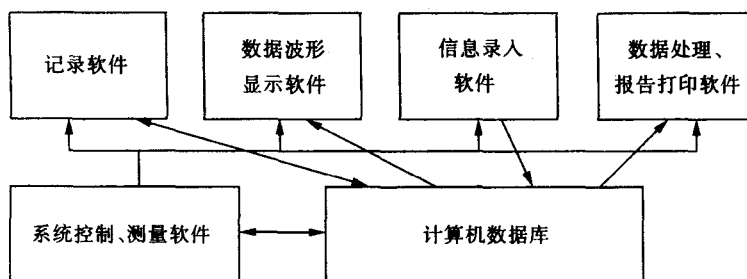


图6-5 自动测量系统软件结构框图

第三节 额定条件下的空载试验

1 一般要求

三相变压器进行三相空载试验时,三相电源电压应该是对称平衡的,即负序电压分量不超过正

序电压分量的 5%;施加电压波形应是近似正弦波形和额定频率。所谓近似正弦波形就是如图6-6所示的波形,即电压曲线上所有纵坐标与正弦曲线相应纵坐标之间的差别不超过正弦曲线振荡幅值的5%($\frac{U_1-U}{U_m} \times$

100% $\leq \pm 5\%$)。如果用示波器观察,实际波形不超出图6-6(b)两个正弦波形的0.1H时即认为符合正弦波形要求。

2 空载损耗的计算

空载损耗 P_0 按下式计算:

$$P_0 = P_0' - P_{WV} - P_S \quad (6-1)$$

式中 P_0' ——实测损耗,kW;

P_{WV} ——仪表损耗,kW;

P_S ——测量电缆损耗,kW。

上述公式适用于 P_{WV} 和 P_S 超过 P_0' 2%的中小型变压器。对于 P_{WV} 和 P_S 不超过 P_0' 2%的中小型和大型变压器,则两者可以忽略不计。

3 空载电流的计算

空载电流 I_0 以百分数表示,按下式计算:

$$I_0 = \frac{I_{0a} + I_{0b} + I_{0c}}{3I_r} \times 100\% \quad (6-2)$$

式中 I_{0a}, I_{0b}, I_{0c} ——a、b、c三相实测空载电流,A;

I_r ——励磁绕组额定电流,A。

4 波形校正

4.1 空载电压波形发生畸变的原理及影响

当在变压器任意一侧绕组上施加正弦波形的额定电压时,在变压器铁心中产生的磁通也为正弦波形,但由于铁心磁化曲线是非线性的,所以空载电流的波形也是非正弦的。空载电流波形产生畸变的原理见图6-7。

对于带有三角形联结法绕组的变压器,空载电流中出现的高次谐波以3次谐波分量为最大;对于没有三角形联结法绕组的变压器,由于不出现3的倍数谐波,所以,空载电流中出现的高次谐波以5次谐波分量为最大。

由于非正弦波形空载电流的存在将造成发电机输出电压波形的畸变,尤其是当发电机输出电压较低或发电机容量不足时,电压波形的畸变就更为严重,所以,破坏了正弦波形的波形因数。由于铁心中的磁滞损耗与施加电压的平均值有关,即与电压波形的面积有关,而与电压的有效值无关,所以,电压波形将直接影响空载损耗和空载电流的测量,为此要对空载损耗进行波形校正。

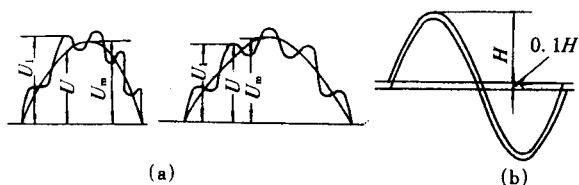


图6-6 正弦波形的检查方法

(a)幅值法 (b)示波器法

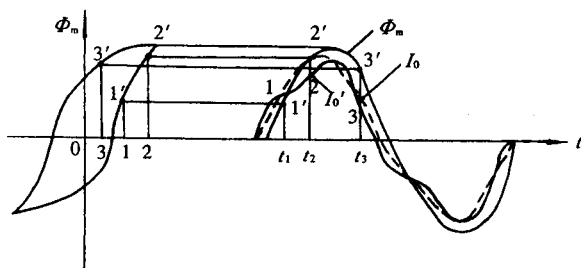


图6-7 空载电流畸变波形图

Φ_m —主磁通(正弦波形) I_0' —畸变空载电流波形

I_0 —空载电流的等效正弦波形

4.2 校正方法

校正电压波形时,以平均值电压表为准施加额定电压 U_r ,测量空载损耗 P_0' 和空载电流 I_0' ,同时记录有效值电压表读数 U' 。如果 U' 与 U_r 之差在3%之内,则空载损耗 P_0 按下式进行校正:

$$P_0 = P_0' (1 + d) \quad (6-3)$$

式中 $d = \frac{U' - U_r}{U_r}$ (d 通常为负值)。

如果 U_r 与 U' 之差大于3%,则应按协议确认试验的有效性。

5 测量互感器角差影响的校正

5.1 测量互感器角差影响的理论分析

如第六章第二节中2.1所述,对于大型变压器的空载损耗和负载损耗测量,由于功率因数很低,这时测量互感器的角差将对上述损耗的测量造成一定的测量误差,原因就是互感器的角差造成了电流、电压的相位移,相量图见图6-8。

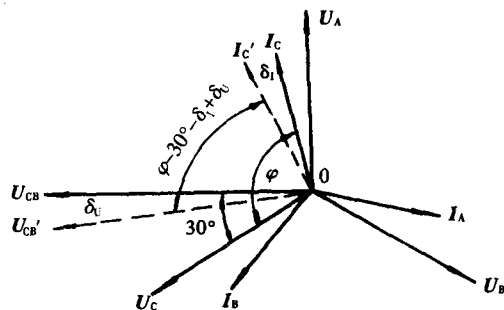


图6-8 互感器角差影响的相量图

δ_1 —C相电流互感器的角差 δ_2 —B、C相电压互感器的角差 φ —负载的功率因数 U_{CB}' —C、B相二次侧电压折算到一次侧电压并翻转180° I_C' —C相二次侧电流折算到一次侧电流并翻转180° U_{CB} —C、B相一次侧电压 I_C —C相一次侧电流

5.2 校正方法

由测量互感器角差影响的理论分析和相量图可知,C相功率 P_1 和实测功率 P_1' 分别为:

$$P_1 = U_{CB} I_C \cos(\varphi - 30^\circ)$$

$$P_1' = U_{CB}' I_C' \cos[(\varphi - 30^\circ) - (\delta_{1C} - \delta_{UCB})]$$

设 $\psi_2 = \varphi - 30^\circ$, $\delta_2 = \delta_{1C} - \delta_{UCB}$,则C相功率产生的相对误差 β_1 为:

$$\beta_1 = \frac{P_1' - P_1}{P_1} \times 100\% = \left[\frac{\cos(\psi_2 - \delta_2)}{\cos\psi_2} - 1 \right] \times 100\% = \left[\frac{\cos\psi_2 \cdot \cos\delta_2 + \sin\psi_2 \cdot \sin\delta_2}{\cos\psi_2} - 1 \right] \times 100\%$$

由于互感器的角差均以分计,所以对于小角度的正弦、余弦函数可简化成 $\cos\delta_2 = 1$, $\sin\delta_2 = \delta_2$,故

$$\beta_1 = \left[\frac{\cos\psi_2 + \delta_2 \sin\psi_2}{\cos\psi_2} - 1 \right] \times 100\% = \delta_2 \cdot \tan\psi_2 \times 100\%$$

将角差“分”变为“弧度”,因为 $1' = \frac{\pi}{180 \times 60} = 0.000291$ 弧度,所以 $\beta_1\% = 0.0291 \delta_2 \cdot \tan\psi_2$,功率 P_1 校正值为:

$$P_1 = \frac{P_1'}{1 + \beta_1\%} \quad (6-4)$$

同理,对于A相功率 P_2 ,其校正值为:

$$P_2 = \frac{P_2'}{1 + \beta_2\%} \quad (6-5)$$

式中 $\beta_2\% = 0.0291 \delta_1 \cdot \tan\psi_1$ ($\psi_1 = \varphi + 30^\circ$)

变压器的三相功率 P 为:

$$P = P_1 \pm P_2 = \frac{P_1'}{1 + \beta_1\%} \pm \frac{P_2'}{1 + \beta_2\%} \quad (6-6)$$

实际试验中,对于额定电压下的空载试验一般都是两瓦特表相减。

第四节 非额定条件下的空载试验

1 单相空载试验

如果无三相试验电源或者需要对三个铁心柱进行缺陷分析时,则可以对三相变压器进行单相空载试验。

单相空载试验时,如果励磁绕组为星形联结法,则应采用二相串联励磁,励磁电压为 $2/\sqrt{3}$ 倍额定电压;如果励磁绕组为三角形联结法,则应采用二相并联励磁、第三相短路,励磁电压为额定电压。单相空载试验时,要轮流对a、b两相、b、c两相和c、a两相进行三次测量,测量线路和测量方法同单相变压器。

对于铁心为三柱的三相变压器其三相磁路不平衡,a、b和b、c两相磁路相对应,c、a两相磁路较长(见图6-9)。所以,a、b和b、c两相测得的空载损耗和空载电流应近似相等,c、a两相测得的空载损耗和空载电流应大于a、b和b、c两相,其增大的比例随铁心结构的不同而存在一定的差异,具体实例见表6-1。

对于铁心为五柱的三相变压器,由于每次励磁的磁路是相似的,均是二铁心柱、二旁轭和上、下铁轭(见图6-10),所以,三次测量的空载损耗和空载电流基本上是相同的,具体实例见表6-2。

1.1 空载损耗的计算

不论变压器是三铁心柱,还是五铁心柱,也不论是星形联结绕组,还是三角形联结绕组,由于a、b、c三三相的空载损耗均测量了两次,所以,折算到三相的空载损耗 P_0 为:

$$P_0 = \frac{W_1 + W_2 + W_3}{2} = P_a + P_b + P_c \tag{6-7}$$

由上可知,a、c相测得的空载损耗 W_3 大于a、b和b、c相测得的空载损耗 W_1 和 W_2 ,即 $W_3 = KW_1 = KW_2$,式中K值一般由铁心的结构决定,可用下式予以估算:

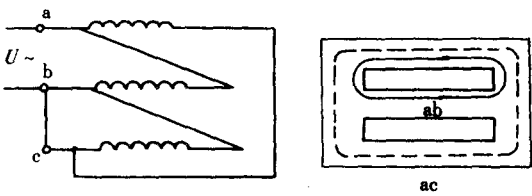


图6-9 三柱式铁心单相空载试验线路和磁路
(虚线所示为ac相励磁时磁路)

表6-1 三柱式铁心单相空载试验数据

励磁回路		短路回路		变压器额定容量及试验数据					
				120MVA 自耦		90MVA		120MVA 自耦	
端子	高压相别	端子	高压相别	空载损耗 /kW	空载电流 /A	空载损耗 /kW	空载电流 /A	空载损耗 /kW	空载电流 /A
a、b	A、B	b、c	C	33.9	27	67.8	51.8	30.2	21
b、c	B、C	a、c	A	34.4	28.5	68.8	50.3	30.2	21
c、a	C、A	a、b	B	50.2	46.5	97.5	70.3	45.9	37.5

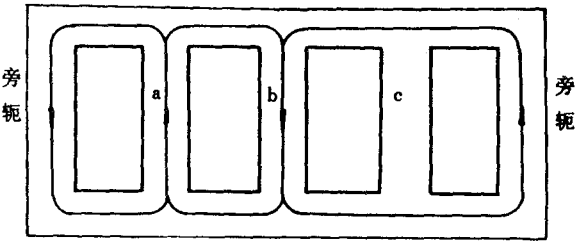


图6-10 五柱式铁心单相空载试验磁路(a、b励磁)

表6-2 五柱式铁心单相空载试验数据

励磁回路		短路回路		变压器额定容量及试验数据					
				120MVA 自耦		120MVA		120MVA 自耦	
端子	高压相别	端子	高压相别	空载损耗 /kW	空载电流 /A	空载损耗 /kW	空载电流 /A	空载损耗 /kW	空载电流 /A
a、b	A、B	b、c	C	89.3	42	88.1	40.5	111	60
b、c	B、C	a、c	A	90.1	42.6	87.6	39	110.9	57
c、a	C、A	a、b	B	89.3	45	87.6	40.5	111.9	60.2

$$K = \frac{H + 2M_0 \left(\frac{S_1}{S_2} \right)}{H + M_0 \left(\frac{S_1}{S_2} \right)} \quad (6-8)$$

式中 H ——铁心窗高, m;

M_0 ——三相铁心柱中心距, m;

S_1 ——铁心柱截面积, cm^2 ;

S_2 ——铁轭截面积, cm^2 。

对于63kV及以下电压等级的变压器, K 值一般为1.3~1.4; 对于110~220kV电压等级的变压器, K 值一般为1.4~1.5。

如果实测结果 W_1 与 W_2 有较大差别, 或 W_3 与 W_1 、 W_2 之间的关系超过一般同类产品的比例时, 则证明铁心的某部分可能存在缺陷, 需要对产品进行进一步的试验及分析。

1.2 空载电流的计算

当变压器的励磁绕组为星形联结时, 由于每次均为二相串联励磁, 施加电压为2倍的额定相电压, 线电流等于相电流, 所以, 空载电流可用下式计算:

$$I_0 = \frac{I_{ab} + I_{bc} + I_{ac}}{3I_r} \times 100\% \quad (6-9)$$

当变压器的励磁绕组为三角形联结时, 由于每次均为二相并联励磁, 励磁电压为额定相电压, 线电流等于 $\sqrt{3}$ 倍相电流, 但由于此时相电流等于 $\frac{1}{2}$ 实测电源电流, 所以, 空载电流可用下式计算:

$$I_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_{ab} + I_{bc} + I_{ac}}{3I_r} \times 100\% \quad (6-10)$$

2 降低电压下的空载试验

由于电源容量不足, 可以降低电压进行空载试验, 但电压一般不应低于额定电压的90%, 此时, 应用下式将空载损耗校正到额定电压:

$$P_0 = P'_0 \left(\frac{U_r}{U'} \right)^n \quad (6-11)$$

式中 P'_0 ——试验电压下实测空载损耗, kW;

U' ——试验电压, kV;

n ——校正系数。

校正系数 n 取决于铁心硅钢片的种类, 对于冷轧硅钢片, $n=1.9\sim 2$ 。

3 非额定频率下的空载试验

3.1 励磁电压的校正

由变压器感应电势 $E=4.44fW\Phi_m$ 可知, 当变压器的空载试验电压一定时, 试验频率和铁心的磁通 Φ_m 成反比。如果变压器空载试验时的电源频率不等于产品的额定频率, 如低于或高于额定频率, 此时, 如果仍施加额定电压, 则势必造成变压器铁心的过励磁或欠励磁, 并由此造成空载损耗和空载电流与额定频率时不同。所以, 当试验电源频率不等于变压器的额定频率 f_N 时, 一定要校正试验频率对空载损耗和空载电流的影响。

从变压器感应电势的计算公式可知,当变压器的磁通 Φ_m 一定时,频率 f 和电压 U 成正比。这就是说,要保持变压器铁心的额定磁通 Φ_m ,应根据试验电源频率 f 成比例地增减励磁电压,即试验时的励磁电压 U' 为:

$$U' = U \frac{f}{f_N} \quad (6-12)$$

3.2 空载损耗、空载电流的校正

经过励磁电压的校正,虽然可以保证变压器的磁通为额定磁通,但由于该磁通的频率并不等于额定频率,所以,产生的空载损耗和空载电流也不等于额定频率下的磁通所产生的空载损耗和空载电流,故还必须对空载损耗和空载电流进行频率校正。

3.2.1 空载损耗的校正

由于变压器的空载损耗是由磁滞损耗和涡流损耗所构成,而磁滞损耗与频率 f 的一次方成正比,涡流损耗与频率的二次方成正比,所以,空载损耗应用下式进行校正:

$$P_0 = P_0' \left[P_1 \left(\frac{f_N}{f} \right) + P_2 \left(\frac{f_N}{f} \right)^2 \right] \quad (6-13)$$

式中 P_0' ——试验频率为 f 时的实测损耗,kW;

P_1, P_2 ——磁滞和涡流损耗与空载损耗之比,对于冷轧硅钢片 $P_1 = P_2 = 0.5$ 。

3.2.2 空载电流的校正

由于变压器的空载电流由有功分量电流 $I_{0\alpha}$ 和无功分量电流 $I_{0\beta}$ 两部分组成,所以,首先应对有功和无功分量电流进行校正,然后再对总的空载电流 I_0 进行校正,校正公式如下:

$$I_{0\alpha} = P_0' \left[P_1 \left(\frac{f_N}{f} \right) + P_2 \left(\frac{f_N}{f} \right)^2 \right] / U' \quad (6-14)$$

$$I_{0\beta} = \sqrt{(I_0')^2 - \left(\frac{P_0'}{U'} \right)^2} \quad (6-15)$$

$$I_0 = \sqrt{I_{0\alpha}^2 + I_{0\beta}^2} \quad (6-16)$$

式中 I_0' ——试验频率为 f 时的实测空载电流。

由于变压器,尤其是大型变压器空载电流的有功分量所占比重很小,所以在试验频率偏离额定频率 $\pm 10\%$ 的情况下,可不进行频率校正。

第五节 绝缘装配前铁心的空载试验

铁心叠装之后、绕组套装之前,为了鉴定铁心的空载损耗和空载电流是否符合标准要求 and 是否存在整体和局部缺陷,同时也为了与绝缘装配后的半成品空载试验进行比较,应进行绝缘装配前铁心的空载试验。由于铁心上没有套装绕组,所以,必须在铁心柱上绕上临时绕组。

1 临时绕组的计算

1.1 每匝电压 e_1

为了保证铁心柱和铁轭中的磁通与变压器额定条件时相同,临时绕组的每匝电压应与设计计算时的相同,或者用绕组的额定电压和匝数进行计算。计算时一般用低压绕组,如果用高压绕组,应用同一分接电压和分接匝数。

1.2 临时绕组的匝数 N

施加在临时绕组上的线电压应小于、等于电源的额定电压,而且不经过中间变压器。电源的额

定电压除以每匝电压,即可求得临时绕组的匝数。

1.3 临时绕组的额定电压 U (相电压)

临时绕组的额定电压等于临时绕组的匝数乘以每匝电压,即 $U=N \cdot e_1$ 。

1.4 临时绕组的额定电流 I

对于单相变压器,临时绕组的额定电流等于变压器的额定容量除以临时绕组的额定电压,即 $I=S_r/U$ 。

对于三相变压器,临时绕组的额定电流等于变压器的额定容量除以临时绕组3倍的额定电压,即 $I=S_r/3U$ 。

1.5 临时绕组的联结组

临时绕组的联结组应与变压器的联结组相同。

2 额定励磁电压下的三相空载试验

在临时绕组上施加额定励磁电压,测量铁心的空载损耗和空载电流,看其是否符合标准和有关技术条件要求。

3 额定励磁电压下的单相空载试验

在临时绕组上施加额定励磁电压,分别测量三空的空载损耗,以验证三空的磁路是否平衡和是否符合设计要求。

4 降低励磁电压下的三相空载试验

对于高电压的变压器的器身,由于绝缘装配后不能进行额定励磁电压下的三相空载试验,为了便于与绝缘装配后进行的降低励磁电压的三相空载试验(目的是为了发现绕组套装后的铁心装配质量和绕组有无局部短路)进行比较,所以,绝缘装配前应进行降低励磁电压下的三相空载试验。

根据技术条件和有关要求,施加在临时绕组上的空载励磁电压一般不应超过额定励磁电压的15%。绝缘装配后空载试验施加的励磁电压应和绝缘装配前空载试验加的励磁电压相同。

第六节 空载损耗、空载电流增大的原因分析

1 空载损耗增大的原因分析

- (1)铁心硅钢片之间绝缘不良,或某一部分硅钢片之间短路。
- (2)穿心螺杆或压板的绝缘损坏造成铁心的局部短路。
- (3)绕组匝间(包括正常线匝和换位处等)绝缘损伤造成的匝间短路。
- (4)绕组并联导线之间短路或并联匝数不相同。
- (5)除上述原因外,铁心结构的不同、硅钢片的厚度不均和磁通密度的高低都直接影响空载损耗。

2 空载电流增大的原因分析

- (1)1所列的原因。
- (2)铁心接缝过大。

第七章 短路阻抗和负载损耗测量

第一节 概 述

变压器的短路阻抗和负载损耗测量习惯上称为负载试验,以下仍简称为负载试验。

变压器的负载试验是在相应分接位置和额定频率下对变压器的一侧绕组(通常为被试一对绕组中电压较高的一侧绕组)施加近似正弦波形的额定电流或不小于50%额定电流的任一电流,另一绕组用足够大截面的导体短路(三绕组变压器的非被试绕组应开路),然后测量负载损耗和短路阻抗的试验。

变压器负载试验的目的是通过测量变压器的负载损耗和短路阻抗,看其是否符合产品有关标准和技术条件要求,并对负载损耗和短路阻抗不符合标准要求的原因进行分析,找出变压器结构和制造上的缺陷。

变压器的负载损耗,一部分是电流通过绕组产生的电阻损耗(I^2R),另一部分是由于漏磁通引起的各种附加损耗。附加损耗的一部分是绕组导线在交变磁场作用下产生的涡流损耗,另一部分是漏磁通穿过绕组压板、铁心夹件、油箱等结构件产生的杂散损耗。对于小型变压器,附加损耗一般不超过电阻损耗的10%;对于大、中型变压器,附加损耗可由电阻损耗的10%增加到100%,甚至超过绕组的电阻损耗。

变压器的负载电流除了产生负载损耗外,还在绕组中产生电压降,从而使变压器在负载时的输出电压低于空载电压。负载电流在绕组中产生的电压降以绕组额定电压的百分数表示,称为短路阻抗压降(也称阻抗电压压降)。短路阻抗压降包括与负载损耗相对应的等效电阻上的电阻压降分量和与绕组漏磁通相对应的漏抗上的电抗压降分量,上述两个压降分量无法分别测量,只能在测出负载损耗和短路阻抗之后用计算的方法求出。

变压器负载试验依据的标准除GB1094、GB/T 6451等国家标准外,还有产品的技术条件。

第二节 试验方法

变压器负载试验线路及方法基本上与空载试验线路及方法相同,既可以采用仪表测量系统,也可以采用自动测量系统。不同的是由于没有波形畸变问题,所以不需要进行波形校正(即不需要并联平均值电压表)。另外,施加电压(电流)的绕组为较高电压的绕组,电压互感器的电压比和电流互感器的电流比不同。故本节仅叙述仪表测量系统的试验线路及方法。

1 试验线路

单相和三相变压器的试验线路分别见图7-1、图7-2和图7-3(图中符号意义与空载试验线路相同)。

2 试验方法

对于双绕组变压器,试验只需进行一次,即高压绕组施加电流,低压绕组短路,试验一次。

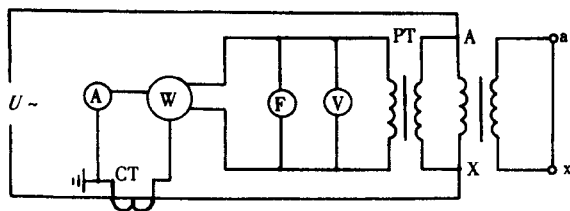


图7-1 单相变压器负载试验线路

对于三绕组变压器,试验时应分别对每对绕组按双绕组变压器的试验方法试验一次,共需进行三次,即:高压绕组施加电流,中压绕组短路,低压绕组开路,试验一次;高压绕组施加电流,低压绕组短路,中压绕组开路,试验一次;中压绕组施加电流,低压绕组短路,高压绕组开路,试验一次。

对于自耦变压器,可看成双绕组变压器;对于具有独立第三绕组的自耦变压器,可看成三绕组变压器,试验方法分别与双绕组和三绕组变压器相同。

对于带有分接范围的变压器,如果产品要进行短路承受能力试验,或者分接范围超过 $\pm 5\%$ 时,试验应分别在主分接和两个极限分接进行。

变压器短路阻抗和负载损耗测量时,由于变压器的电阻损耗与绕组的温度成正比,其他

损耗与绕组的温度成反比,所以,为了尽量减小温度变化对负载测量数据的影响,一方面应加快试验时读取数据的速度,另一方面应及时准确地记录试验时的绕组温度。

负载损耗和短路阻抗应校正到参考温度。短路阻抗用电抗和电阻相量和来表示。

第三节 额定条件下的三相负载试验

三相变压器负载试验时的电流和电压应以三相仪表读数的算术平均值为准,负载损耗应取二瓦特表或三瓦特表读数的代数和。

对于三绕组变压器,当各个绕组容量不相等时,对容量不相等的一对绕组的负载试验,施加电流应以较低容量绕组的额定电流为准,但计算阻抗电压时,仍应以最大容量的绕组为准。

1 绕组电阻损耗的计算

1.1 单绕组电阻损耗计算

如用线电阻计算,不论变压器绕组是星形联结,还是三角形联结,三相的电阻损耗均为:

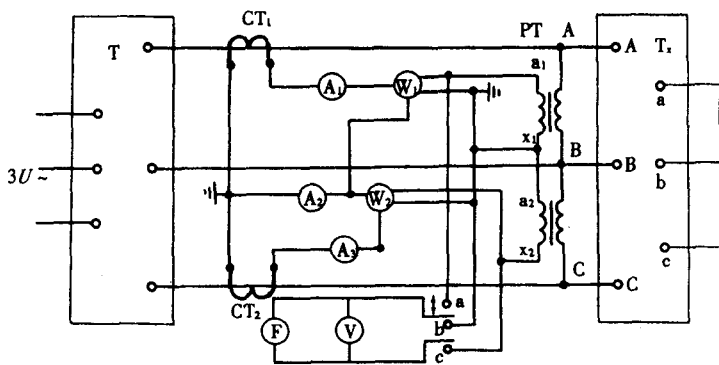


图7-2 三相变压器二瓦特表负载试验线路

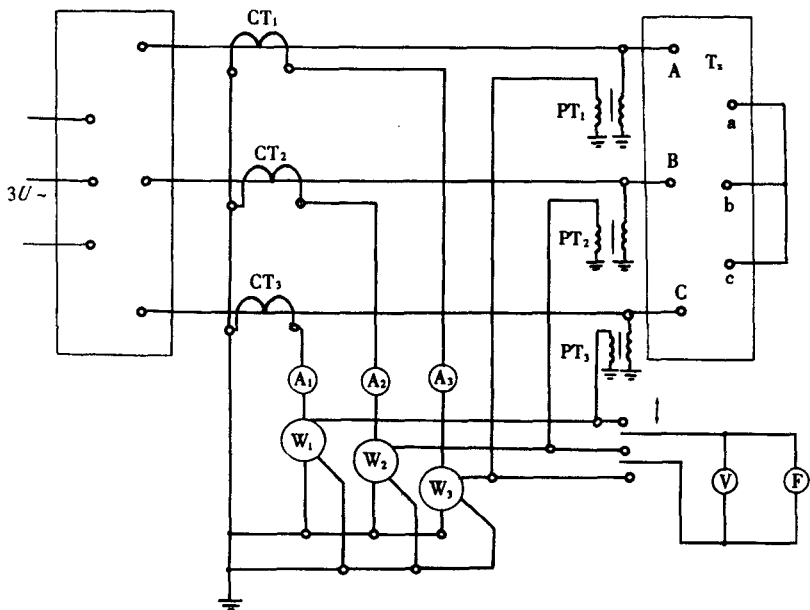


图7-3 三相变压器三瓦特表负载试验线路

$$P_{KR}=1.5I_r^2R_{x1} \quad (7-1)$$

式中 P_{KR} ——变压器三相的电阻损耗, kW;

I_r ——变压器绕组的额定线电流, A;

R_{x1} ——变压器绕组的线电阻, Ω 。

如用相电阻计算, 当变压器绕组为星形联结时, 三相的电阻损耗为:

$$P_{KR}=3I_r^2R_{x\phi} \quad (7-2)$$

式中 $R_{x\phi}$ ——变压器绕组的相电阻, Ω 。

如用相电阻计算, 当变压器绕组为三角形联结时, 三相的电阻损耗为:

$$P_{KR}=I_r^2R_{x\phi} \quad (7-3)$$

1.2 一对绕组的电阻损耗计算

当用线电阻计算时, 不论变压器一对绕组的联结组是星形—星形联结, 还是星形—三角形联结, 三相的电阻损耗均为:

$$\Sigma P_{KR}=1.5(I_{r1}^2R_{x11}+I_{r2}^2R_{x12}) \quad (7-4)$$

当用相电阻计算时, 如变压器一对绕组的联结组为星形—星形联结, 则三相的电阻损耗为:

$$\Sigma P_{KR}=3(I_{r1}^2R_{x\phi1}+I_{r2}^2R_{x\phi2}) \quad (7-5)$$

当用相电阻计算时, 如变压器一对绕组的联结组为星形—三角形联结, 则三相的电阻损耗为:

$$\Sigma P_{KR}=3I_{r1}^2R_{x\phi1}+I_{r2}^2R_{x\phi2} \quad (7-6)$$

2 负载损耗的校正

2.1 电流校正

当试验电流不等于变压器绕组的额定电流时, 应将试验电流下实测的负载损耗校正到额定电流, 校正公式为:

$$P_K=P_{Kt}\left(\frac{I_r}{I_t}\right)^2 \quad (7-7)$$

式中 P_K ——校正到额定电流时的负载损耗, kW;

P_{Kt} ——试验电流下实测的负载损耗, kW;

I_t ——试验时实加的试验电流, A。

2.2 参考温度校正

在任一绕组温度下实测的负载损耗应校正到参考温度下的负载损耗, 校正公式为:

$$P_{K75}=K\Sigma I_r^2R+\frac{P_F}{K}=\frac{K^2\Sigma I_r^2R+P_F}{K}=\frac{(K^2\Sigma I_r^2R-\Sigma I_r^2R)+(\Sigma I_r^2R+P_F)}{K}=\frac{P_{Kt}+(K^2-1)\Sigma I_r^2R}{K} \quad (7-8)$$

式中 P_{K75} ——校正到参考温度下的负载损耗, kW;

R ——绕组的线电阻或相电阻, Ω ;

P_F ——变压器的附加损耗, kW;

K ——参考温度系数。

式(7-8)适用于绕组电阻测量温度与负载损耗测量温度相同的情况下。如果两个温度不相同, 应先将绕组电阻校正到负载损耗测量温度下的电阻, 然后再将负载损耗用式(7-8)校正到参考温度。

参考温度系数 $K = \frac{235+t_K}{235+t}$ (铜导线), $K = \frac{225+t_K}{225+t}$ (铝导线), 式中 t_K 为变压器绝缘耐热等级的参考

温度, 如油浸变压器 $t_K=75^\circ\text{C}$ 。干式变压器F级 $t_K=120^\circ\text{C}$; B级 $t_K=100^\circ\text{C}$; H级 $t_K=145^\circ\text{C}$ 。

2.3 测量互感器角差影响的校正

对于大型、特大型变压器, 由于负载试验时的功率因数较空载试验时还要小, 所以对于测量互感器角差的影响不可忽略, 应按第六章第二节5.2项的方法对测量互感器角差的影响进行校正。

3 阻抗电压的校正

3.1 电流校正

当试验电流不等于额定电流时, 应将阻抗电压校正到额定电流下的阻抗电压, 校正公式为:

$$u_K = \frac{u_{Kt} \left(\frac{I_r}{I_t} \right)}{U_r} \times 100\% \quad (7-9)$$

式中 u_K ——校正到 I_r 下的阻抗电压, %;

u_{Kt} ——试验电流 I_t 下实测的阻抗电压, kV;

U_r ——变压器的额定电压, kV。

3.2 参考温度校正

3.2.1 电阻压降校正

由于电阻压降与温度系数成正比, 所以电阻压降可用下式校正:

$$u_{Kr75} = u_{Kt} K = \frac{P_K}{10S_r} K \quad (7-10)$$

式中 u_{Kr75} ——校正到参考温度时的电阻压降, %;

u_{Kt} ——实测的电阻压降, %;

S_r ——变压器的额定容量, kVA。

3.2.2 电抗压降校正

由于电抗压降与温度无关, 所以电抗压降仍用下式计算:

$$u_{Kx} = \sqrt{u_K^2 - u_{Kr}^2} = \sqrt{u_K^2 - \left(\frac{P_K}{10S_r} \right)^2} \quad (7-11)$$

3.2.3 阻抗电压校正

$$u_{K75} = \sqrt{u_{Kx}^2 + u_{Kr75}^2} = \sqrt{u_K^2 + \left(\frac{P_K}{10S_r} \right)^2 (K^2 - 1)} \quad (7-12)$$

式中 u_{K75} ——校正到参考温度下的阻抗电压, %。

4 短路阻抗的计算

变压器的短路阻抗 Z 以每相欧姆表示, 可用下式计算:

$$Z = \frac{u_{K75}}{100} \times \frac{U_r^2}{S_r} \quad (7-13)$$

第四节 非额定条件下的短路阻抗和负载损耗测量

1 单相试验

当没有三相电源或需要对负载损耗和短路阻抗增大的原因进行分析时, 应采用单相电源进行

单相试验。单相试验一般采用两相电源加压的方法,即两相电源依次施加在AB相、BC相和CA相上,并使试验电流等于 I_r ,或大于50% I_r 的任一电流,然后测量负载损耗和短路阻抗。

1.1 Yy、Yd联结组

对于Yy、Yd联结组的变压器,励磁绕组为星形联结,见图7-4。每次试验时,高压两相绕组中有试验电流,故测量的负载损耗和短路阻抗相当于两相的负载损耗和短路阻抗,取三次试验的平均值再除以2即为每相的负载损耗和短路阻抗。

1.1.1 电阻损耗计算

设 R_A 、 R_B 、 R_C 为被试一对绕组的等效电阻,则每次试验时的电阻损耗分别为: $P_{ABR}=I_r^2(R_A+R_B)$; $P_{BCR}=I_r^2(R_B+R_C)$; $P_{CAR}=I_r^2(R_C+R_A)$,三者相加再除以2即为三相的电阻损耗,即: $P_R=\frac{1}{2}(P_{ABR}+P_{BCR}+P_{CAR})=I_r^2(R_A+R_B+R_C)=I_\phi^2(R_A+R_B+R_C)$ 。

1.1.2 负载损耗计算

因为每相的负载损耗 $P_K'=\frac{1}{2}\times\frac{P_{AB}+P_{BC}+P_{CA}}{3}$,所以三相的负载损耗 $P_K=3P_K'=\frac{1}{2}\times(P_{AB}+P_{BC}+P_{CA})$ 。

1.1.3 短路阻抗计算

因为以相电压表示的短路阻抗 $u_K'=\frac{1}{2}\times\frac{U_{AB}+U_{BC}+U_{CA}}{3}$,折算到线电压的短路阻抗 $u_K=\frac{\sqrt{3}}{2}\times\frac{U_{AB}+U_{BC}+U_{CA}}{3}$, $u_K(\%)=\frac{\sqrt{3}}{2}\times\frac{U_{AB}+U_{BC}+U_{CA}}{3U_r}\times 100\%=28.9\times(\frac{U_{AB}+U_{BC}+U_{CA}}{U_r})$ 。

1.2 Dy、Dd联结组

对于Dy、Dd联结组的变压器,励磁绕组为三角形联结,每次试验时,其中一个绕组(如B相绕组)通过的电流为 $\frac{2}{3}$ 的额定线电流,其他两个绕组中通过的电流为 $\frac{1}{3}$ 的额定线电流,见图7-5。

1.2.1 电阻损耗计算

设 R_A 、 R_B 、 R_C 为被试一对绕组的等效电阻,则每次试验时的电阻损耗分别为:

$$P_{R1}=(\frac{2}{3}I_r)^2R_B+(\frac{1}{3}I_r)^2(R_A+R_C)$$

$$P_{R2}=(\frac{2}{3}I_r)^2R_C+(\frac{1}{3}I_r)^2(R_A+R_B)$$

$$P_{R3}=(\frac{2}{3}I_r)^2R_A+(\frac{1}{3}I_r)^2(R_B+R_C)$$

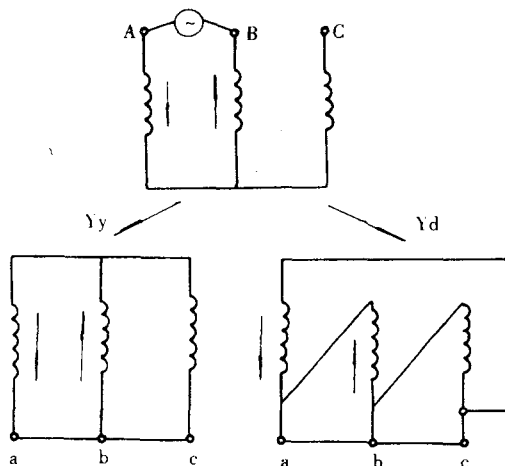


图7-4 Yy、Yd联结组变压器单相负载试验线路

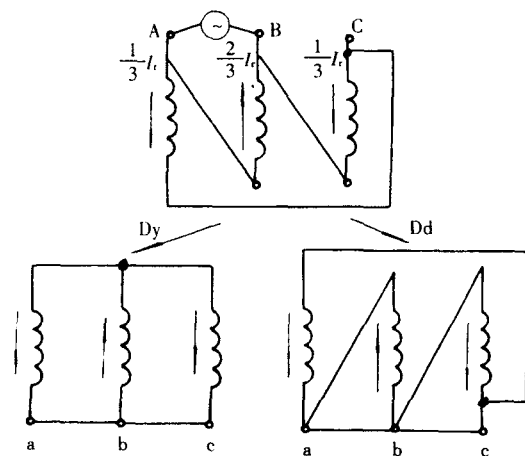


图7-5 Dy、Dd联结组变压器单相负载试验线路

三者相加再除以2即为三相的电阻损耗, 即: $P_R = \frac{1}{2} \times \left[\frac{4}{9} I_r^2 (R_A + R_B + R_C) + \frac{2}{9} I_r^2 (R_A + R_B + R_C) \right] = \frac{1}{2} \times \frac{6}{9} I_r^2 (R_A + R_B + R_C) = \frac{1}{3} I_r^2 (R_A + R_B + R_C)$, 将 I_r 折算到相电流, 则 $P_R = \frac{1}{3} \times (\sqrt{3} I_\Phi)^2 (R_A + R_B + R_C) = I_\Phi^2 (R_A + R_B + R_C)$ 。

1.2.2 负载损耗计算

因为实测负载损耗为一相负载损耗的2倍, 所以三相负载损耗应等于三次实测负载损耗的平均值再乘以 $\frac{3}{2}$, 即: $P_K = \frac{3}{2} \times \left(\frac{P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}}{3} \right) = \frac{1}{2} \times (P_{AB} + P_{BC} + P_{CA})$ 。

1.2.3 短路阻抗计算

B相额定相电流与B相通过的 $\frac{2}{3}$ 额定线电流之比再乘以三次试验测量的短路阻抗的平均值, 即短路阻抗为:

$$u_k = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} I_r}{\frac{2}{3} I_r} \left(\frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \left(\frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \right)$$

$$u_k(\%) = \frac{\sqrt{3}}{6} \times \left(\frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{U_r} \right) \times 100 = 28.9 \times \left(\frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{U_r} \right)$$

由第七章第四节1.1和第七章第四节中1.2计算可知, 不论单相试验时的励磁绕组是星形联结, 还是三角形联结其三相电阻损耗、负载损耗和短路阻抗的计算公式都是相同的。

2 降低电流下的短路阻抗和负载损耗测量

由于试验电源较小, 无法在额定电流下进行短路阻抗和负载损耗测量时, 可在降低电流下进行短路阻抗和负载损耗测量, 但根据标准规定, 试验电流应大于、等于50%额定电流。

降低电流下测量的短路阻抗和负载损耗应分别按本章第三节中2.1和3.1的方法校正到额定电流下的短路阻抗和负载损耗。然后再分别按本章第三节中2.2、2.3和3.2的方法校正到额定条件下的短路阻抗和负载损耗。

3 非额定频率下的短路阻抗和负载损耗测量

当试验电源频率不等于试品的额定频率(如我国的试验电源频率为50Hz, 进口变压器有的额定频率为60Hz)时, 应对短路阻抗和负载损耗测量结果进行校正。

3.1 负载损耗校正

由于变压器的电阻损耗与频率无关, 附加损耗中的涡流损耗与频率的平方成正比, 且约占附加损耗的40%; 而附加损耗中的杂散损耗与频率的一次方成正比, 且约占附加损耗的60%, 所以非额定频率下的负载损耗要用下式校正:

$$P_{K75f} = P_{F75} \left[0.4 \times \left(\frac{f_N}{f} \right)^2 + 0.6 \times \left(\frac{f_N}{f} \right) \right] + \Sigma I_{r75}^2 \quad (7-14)$$

式中 P_{K75f} ——校正到额定频率下的负载损耗, kW;

P_{F75} ——校正到75℃下的附加损耗, kW;

f_N ——变压器的额定频率, Hz;

f ——试验电源频率, Hz。

3.2 短路阻抗校正

由于变压器短路阻抗的有功分量与频率无关, 无功分量与频率成正比, 所以非额定频率下的阻

抗电压可用下式校正:

$$u_K = \sqrt{\left(u_{Kx} \frac{f_N}{f}\right)^2 + u_{Kr}^2} \quad (7-15)$$

由式(7-15)可知:

$$u_{Kx}^2 = (u_K^2 - u_{Kr}^2) \left(\frac{f}{f_N}\right)^2$$

故

$$\begin{aligned} u_{K75f} &= \sqrt{(u_{Kx}^2 + u_{Kr75f}^2)} = \sqrt{(u_K^2 - u_{Kr}^2) \left(\frac{f}{f_N}\right)^2 + u_{Kr75f}^2} = \sqrt{\left(u_K \cdot \frac{f}{f_N}\right)^2 - \left(\frac{P_K}{10S_r}\right)^2 \left(\frac{f}{f_N}\right)^2 + \left(\frac{P_K}{10S_r} \cdot K\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(u_K \cdot \frac{f}{f_N}\right)^2 + \left(\frac{P_K}{10S_r}\right)^2 \left[K^2 - \left(\frac{f}{f_N}\right)^2\right]} \end{aligned} \quad (7-16)$$

式中 u_{K75f} ——校正到参考温度和额定频率下的阻抗电压, %;

u_K ——试验电源频率下实测的短路阻抗, %。

第五节 短路阻抗和负载损耗的影响因素分析

1 短路阻抗影响因素分析

由变压器短路阻抗(主要是电抗压降)的计算公式可知,短路阻抗与变压器的每柱安匝和总的漏磁面积成正比,与变压器绕组的每匝电势和电抗高度成反比。因此,当发现变压器的短路阻抗超过标准规定时,应从调整变压器的每柱安匝、漏磁面积和绕组的高度、辐向尺寸等方面加以考虑。从试验方面来说,应从试验方法(如对高电压小容量的产品,试验时所有仪表的电压应取决于产品)、数据处理等方面加以考虑。

2 负载损耗影响因素分析

变压器的负载损耗主要包括绕组的电阻损耗、附加损耗和漏磁通通过钢结构件(铁心、钢夹件、钢压板和油箱壁)产生的涡流损耗(通常叫杂散损耗)。上述三种损耗,尤其是后两种损耗,对于不同的产品所占百分比也大不相同。如附加损耗,一般大型产品占电阻损耗的10%~30%;而特大型产品则占30%以上,甚至达50%~60%或更高。一般大型产品的杂散损耗也可达30%~40%。

如果发现变压器的负载损耗增大,一般应从减小附加损耗和杂散损耗考虑。如为了减小附加损耗,可采用多根导线并绕或换位导线等;为了减小杂散损耗,可采用非导磁或低导磁结构件以及油箱采用电屏蔽和磁屏蔽等。

从试验方面来说,如果变压器绕组匝间(包括换位处匝间)、段间等存在短路现象,则实测的负载损耗将大为增加。

第八章 外施耐压试验

第一节 概 述

外施耐压试验是标准规定的高电压试验项目之一,并且是考核变压器主绝缘的项目。

变压器的绝缘水平由变压器的保护水平决定。国标 GB311.1—1997 给出了各类设备的标准绝缘水平和短时工频耐受电压。国标 GB1094.3—2003 又给出了变压器的额定短时外施耐受电压。外施耐压试验的目的是用来验证线端和中性点端子及它们所连接绕组的对地及对其他绕组的外施耐受强度。在对变压器进行外施耐电压试验(分级绝缘绕组的线端只进行感应耐压试验)时,变压器的各个绕组都要分别短接起来。因此,被试变压器的匝间绝缘不承受电压,被试变压器在试验时的等值阻抗是容性阻抗,并常用纯电容 C_x 表示它。

第二节 试品及试品的电容值和试验电压值

同一台变压器的不同主绝缘部位有不同的绝缘水平,因而就要分别对不同部位主绝缘进行试验。具体讲,变压器的主绝缘有相间绝缘、高压绕组对低压绕组绝缘、绕组对地绝缘、绕组端部绝缘、引线对地绝缘、引线之间的绝缘以及分接开关对地绝缘等。外施耐压试验的目的主要是考核绕组对地和绕组之间的绝缘强度。且高压绕组、低压绕组和中性点端的绝缘水平不同,因而应对它们分别进行试验。被试部位的电容值,与被试部位的绝缘特点和结构尺寸有关,可计算或直接测量。部分试品电容 C_x 的参考值见表 8-1 和表 8-2。

外施耐压试验的电压值是根据被试部位的绝缘水平确定的。即试验高压主绝缘时,把试验电压施加在高压绕组上,试验电压等于高压绕组的绝缘水平;试验低压主绝缘时,把试验电压施加在低压绕组上,试验电压等于低压绕组的绝缘水平;试验中性点绝缘时,把试验电压施加在绕组的中性点端,试验电压等于中性

表 8-1 110kV 级变压器分级绝缘产品的电容值 pF

试品容量 /kVA	50 000	31 500	20 000	10 000	5 600	3 150
绝缘的部位						
高压-中压、低压、地	14 200	11 400	8 700	6 150	4 200	7 200
中压-高压、低压、地	24 800	24 800	13 200	9 600	—	—
低压-高压、中压、地	19 300	19 300	12 000	9 400	6 800	14 800

表 8-2 220kV 级变压器分级绝缘产品的电容值 pF

试品型号	SFPSL-63000	SSPSL-120000	SSPSL-240000	SFPL-240000	SPF-360000	SFPSZL-120000
绕组联结方式	GY/DY/ZY	GY/ZY/DY	GY/ZY/DY	GY _I /DY _I /DY _{II} /GY _{II}	GY _I /DY _I /DY _{II} /GY _{II}	GY/ZY/DY/TY
绝 缘 的 部 位						
高压—中压、 低压及地	12100	13500	17050	32230	33910	38020
中压—高压、 低压及地	18500	19700	23260	—	—	23260
低压—高压、 中压及地	18200	23600	29940	22470	23790	22160

注:表中所列的变压器均为铝线绕组电力变压器(360000kVA 除外)。

点的绝缘水平。其中,绝缘水平的实际数值,由产品技术条件给出。试验人员应严格执行技术条件的要求,应注意不能把试验电压的允许偏差($\pm 3\%$)当作改变试验电压值的条件,因为试验电压的允许偏差是由随机因素决定的。

第三节 试验设备

外施耐压试验设备包括高电压、调压、测量和保护设备。这些设备的相互关系,用接线图说明,见图 8-1。

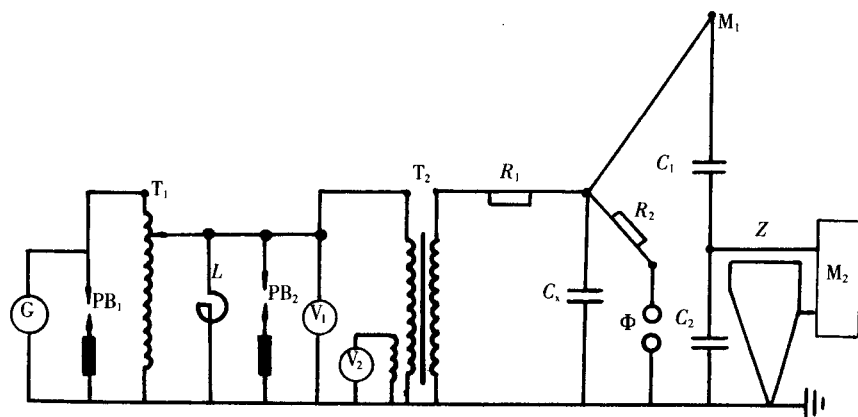


图 8-1 试验设备接线图

C_1 —试品 G —电源设备 T_1 —调压设备 T_2 —高电压设备 Φ —球极 M_1 —电容分压器(由 C_1 和 C_2 组成) M_2 —高电压指示仪 V_1 —原方电压表 V_2 —第三绕组的电压表 L —补偿电感 PB_1 —电源过电压保护 PB_2 —低压绕组过电压保护 R_1, R_2 —保护电阻 Z —电缆阻抗

为便于维护和使用这些设备,以下对这些设备作些说明。

1 对设备输出电压的要求

试验设备输出电压的波形和幅值都应达到标准的要求。在国标 GB/T16927.1—1997 中规定:试验电压的波形为近似正弦波,峰值和有效值之比应为 $\sqrt{2} \pm 0.07$,或高频分量有效值和基波分量有效值之比不超过 5%。试验电压值用有效值表示,并且是用峰值除以 $\sqrt{2}$ 表示。试验电压的指示值,在耐受时间内允许有 $\pm 3\%$ 偏差。这个偏差的规定,一是考虑电源波动,二是考虑电压测量系统的不确定性。为了保证测量电压的偏差不大于 3%,应对电压测量系统的准确度和电压校正设备的准确度提出要求。国标 GB/T 16927.2—1997 中规定允许用球隙放电法校正高电压。球隙放电电压的分散性等于 3%,基本可以满足上述要求。

2 高电压设备

通常使用的高电压设备是高电压试验变压器。单台高压试验变压器的额定电压 (u_H) 有:50、100、150、250、300、500、600 和 750kV。试验变压器的绕组通常有:高压绕组、低压绕组、平衡绕组和电压测量绕组。在绕组之间还有静电屏蔽,用以减少传递过电压。

高压试验变压器的绝缘水平用工频试验电压 (u_T) 表示。工频试验电压根据额定电压 (u_H) 确定,常取: $u_T = 1.1u_H \sim 1.15u_H$ 。由于系数较小(小于试验过电压倍数),故不应该把额定电压当作工作电压 (u),而应该使 $u < u_H$ 。

在试品放电(闪络或击穿)时,试验变压器出现过电压。所以,在变压器的高压端要装设保护球隙,限制端部过电压;在低压绕组的两端和平衡绕组的两端要装设避雷器,限制绕组过电压。当高

电压设备由多级试验变压器串激时, 过电压倍数会增大, 电压分布也会不均匀, 所以更要做好过电压保护工作。

为了保证设备绝缘不出现故障, 应定期检查设备绝缘。应限制工作电压不高于额定电压, 取 $u = 0.8u_H$, 并且要考虑绝缘老化的问题。

为了限制放电过电压, 有的试验室使用快速切断电源的设备, 使电源电压在半个周波内切除, 使放电失去重燃的条件, 以达到限制过电压的目的。

为了限制放电过电压, 可使用串联谐振设备, 使设备在试品放电时失去产生过电压的条件。这种设备的原理接线图见图 8-2。

3 调压器

常用的调压器有自耦调压器、动圈调压器、变磁通调压器和感应调压器。下面就它们的工作原理作些说明。

3.1 自耦调压器

自耦调压器的工作原理和自耦变压器相同。它的电压关系可用图 8-3 说明。

图 8-3 中, M 是一个带绕组的铁心, 绕组的总匝数是 W 。并且, 在绕组上有固定点 A, 有动点 B, 有接地点 X。A 到 X 的匝数为 W_{AX} , 固定不变; B 到 X 匝数为 W_{BX} , 可变。电源电压由 A_1-X_1 接至 A-X; 输出电压由 B-X 接至 B_2-X_2 。输出电压 u_2 和电源电压 u_1 的关系为:

$$u_2 = \frac{W_{BX}}{W_{AX}} u_1 = K \cdot u_1 \quad (8-1)$$

式中 K ——匝数比。

调压器的输出电流 i_2 和输入电流 i_1 的关系为:

$$i_2 = i_1 / K \quad (8-2)$$

$$\text{式中 } i_2 = i_1 + i \quad (8-3)$$

$$\text{所以 } i = (1-K)i_2 \quad (8-4)$$

$$\text{或 } i = -(1 - \frac{1}{K})i_1 \quad (8-5)$$

由图 8-3 可知: B 点对应的匝数 W_{BX} 可以少于 W_{AX} , 或等于 W_{AX} , 或大于 W_{AX} 。所以, u_2 可以小于 u_1 , 可以等于 u_1 , 也可以大于 u_1 。但是, 调压器的容量不能做大, 而且 B 的接触电阻在使用中会增大。这是应该注意的。

3.2 动圈调压器

动圈调压器的结构见图 8-4。它由一个铁心和三个绕组 W_A 、 W_B 和 W_K 组成。其中, W_A 和 W_B 的绕向相反, 并相串联, 称为工作

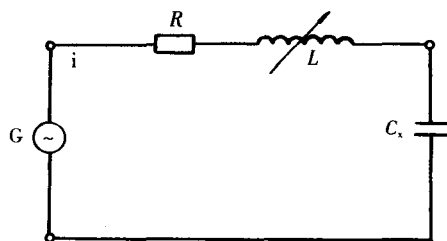


图 8-2 串联谐振设备接线图

G—可控电源 L—可控电感 C_s —试品

R—限制过电压倍数的电阻

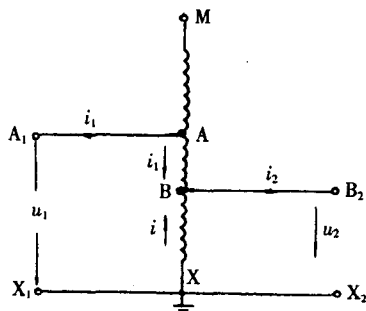


图 8-3 自耦调压器工作原理

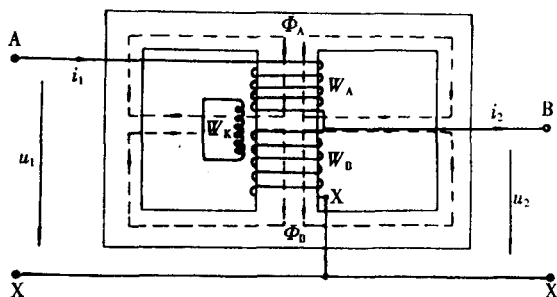


图 8-4 动圈调压器示意图

绕组。 W_K 的两个出线端被短接,并可以上下移动位置,称为调压绕组。

在结构上, W_A 和 W_B 的尺寸相同,匝数相同,并套装在同一个铁心柱的上部和下部。 W_A 和 W_B 的绕向相反,相互串联,所以两个绕组的磁通方向相反。两个绕组的端电压 u_A+u_B 等于输入电压,即:

$$u_1=u_A+u_B \quad (8-6)$$

在空载时,两个绕组流过的电流相同,都等于输入电流 i_1 (励磁电流)。

在结构上, W_K 和 W_A (或 W_B) 相同,匝数也相同,并套装在 W_A 和 W_B 的外面。 W_K 的位置可以上下移动,当 W_K 和 W_A 的磁耦合增大时, W_K 和 W_B 的磁耦合就减小。反之, W_K 和 W_A 的磁耦合减小时, W_K 和 W_B 的磁耦合就增大。例如:当 W_K 的位置高度和 W_A 的位置高度完全相同时, W_K 和 W_A 完全耦合;当 W_K 的位置高度和 W_B 完全相同时, W_K 和 W_B 完全耦合;当 W_K 的位置高度在 W_A 和 W_B 之间时, W_K 既和 W_A 耦合,也和 W_B 耦合。它们之间的磁势总是平衡的。

W_K 的出线端总是被短接着,所以它的工作电压就是感应电势 E_K ,流过 W_K 的电流为

$$I_K=E_K/X_K \quad (8-7)$$

式中, X_K 是 W_K 的漏抗,数值很小,所以 E_K 的数值亦很小。

由上述可知:在调压器的输入电压 u_1 不变条件下,改变 W_K 的位置,就可改变输出电压 u_2 的数值。因为 W_K 的位置变动, W_K 和 W_A 、 W_B 的磁耦合量变化,进而使 i_K 、 Φ_A 和 Φ_B 发生变化, W_A 的匝电势 e_A 和 W_B 的匝电势 e_B 发生变化,最后使 u_A 和 u_B 变化,达到调压目的。

有关这些量的数值变化情况,以下作些说明:

(1)在调压器空载($i_2=0$), W_K 位于 W_A 与 W_B 的中间位置时, W_K 和 W_A 的耦链匝数等于 W_K 和 W_B 的耦链匝数。又因耦链的磁通方向相反,数值相等,故感应电势 $E_K=0$, $i_K=0$,所以, W_K 不会对 W_A 和 W_B 的磁通产生影响,保持 $\Phi_A=-\Phi_B$, $e_A=e_B$, $u_A=u_B=\frac{1}{2}u_1$ 的关系。

(2)在调压器空载, W_K 位于下部时, W_K 和 W_B 完全耦链,即: $W_K i_K=-W_B i_1$, $i_K=-i_1$ 。又因 $i_K=E_K/X_K$, $E_K \approx 0$,故 $u_B \approx 0$, $u_A \approx u_1$,说明 W_A 的匝电势增大一倍, Φ_A 增大一倍,励磁电流增大一倍。

(3)当调压器空载, W_K 位于上部时, W_K 和 W_A 完全耦链,即: $W_K i_K=-W_A i_1$, $i_K=-i_1$ 。又因 $E_K \approx 0$,故 $u_A \approx 0$, $u_B \approx u_1$, W_B 的匝电势 e_B 增大一倍, Φ_B 增大一倍。

(4)在 $i_2=0$, W_K 的位置偏下,和 W_B 耦合 $0.8W_B$ 匝,和 W_A 耦合 $0.2W_A$ 匝, $W_A=W_B$ 时,

$$W_K i_K=-(0.8W_B i_1-0.2W_A i_1)=-0.6W_B i_1$$

$$i_K=-0.6i_1$$

又因磁通和磁势成正比,所以:

$$\Phi_A:\Phi_B=(W_A i_1-W_K i_K):(W_B i_1+W_K i_K)=4:1;$$

$$e_A:e_B=4:1;$$

$$u_A:u_B=4:1;$$

$$u_B=0.2u_1; u_A=0.8u_1;$$

$$e_A \text{ 增大 } 0.6 \text{ 倍}; e_B \text{ 减小 } 0.6 \text{ 倍};$$

$$\text{励磁电流 } i_1 \text{ 增大 } 0.6 \text{ 倍}。$$

(5)在 $i_2=0$, W_K 的位置偏上时, u_B 的电压增高,励磁电流增大。分析方法同(4)。

(6)在 $i_2 \neq 0$ 时,调压器的输入电流 i_1 就要包含励磁电流和负荷电流(i_2)。其中,励磁电流由大磁通值(即由 Φ_A 和 Φ_B 中的较大值)决定;负荷电流由负荷决定,并且,在不计励磁电流的情况下,存在以下关系,即:

$$u_1 i_1 = u_2 i_2$$

$$i_2 = \frac{u_1}{u_2} i_1 = i_1 / K \quad (8-8)$$

式中, $K = u_2 / u_1$, 称为分压比。在分压比的数值变化时, i_2 和 i_1 的数值也改变。并且, 用自耦变压器的数值关系能够说明 W_B 中的负荷电流分量。

3.3 变磁通调压器

该调压器的接线方式见图 8-5。

在图 8-5 中, 有一个三柱铁心、三组绕组和一个接触开关。三组绕组中的第一组是输入绕组, 接至电源 u_1 , 由 W_{10} 组成; 第二组是输出绕组, 由 W_{20} 、 W_{21} 和 W_{22} 组成; 第三组是调压绕组, 由 W_{30} 、 W_{31} 和 W_{32} 组成。

工作时, u_1 保持不变, u_2 均匀变化, 变化范围是 “0~ $2u_1$ ”。

各个绕组的匝数相等, 绕向按图所示。接触开关 K 的触头可以均匀变动, 用以改变 u_2 的数值。

各个绕组都有电势, 电势方向根据电磁感应定律(右手定则)和惯用法则标出, 见图 8-6。

根据电势的方向, 可以知道 u_2 的变化, 即:

(1) 当把开关触头 K 接在 W_{30} 的上部端点时, W_{31} 被短接, 因而 $\Phi_1 = 0$, $E_{21} = 0$, $\Phi_2 = \Phi_0$, $u_2 = E_2 + E_{22} = 0$ 。

(2) 当把开关触头 K 接在 W_{30} 的下部端点时, W_{32} 被短接, 因而 $\Phi_2 = 0$, $E_{22} = 0$, $\Phi_1 = \Phi_0$, $u_2 = E_2 + E_{21} = 2u_1$ 。

(3) 当把开关触头 K 接在 W_{30} 的中间位置时, 在数值上, $E_{31} = -\frac{1}{2}E_3$, $E_{32} = \frac{1}{2}E_3$, 调压绕组的电流是零值, $\Phi_1 = \Phi_2 = \frac{1}{2}\Phi_0$, $E_{22} = -E_{21}$, 所以 $u_2 = E_2 + E_{22} + E_{21} = E_2 = u_1$ 。

所以说, u_2 的变化范围是 “0~ $2u_1$ ”。并且, 输入功率($u_1 i_1$)等于输出功率($u_2 i_2$), 调压绕组的功率很小(约为输入功率的四分之一), 开关的开断电流很小。这就是它的优点。

3.4 感应调压器

感应调压器的接线方式见图 8-7。其中, 一个是定子, 另一个是转子, 改变转子的空间相位就可以改变输出电压 u_2 。

图 8-7 中的定子是三相绕组, 定子在空间的位置不变, 定子的输入端(A、B、C)接电源, 定子的输出端(X、Y、Z)接用电设备。

图 8-7 中的转子是三相绕组, 星形联结, 线端接电源。在转子的三个绕组中有电流, 因而产生

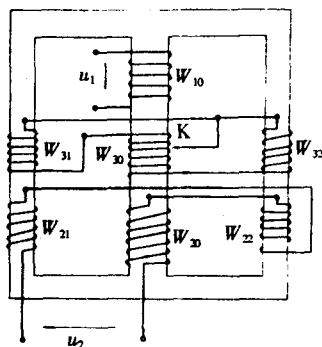


图 8-5 变磁通调压器接线图

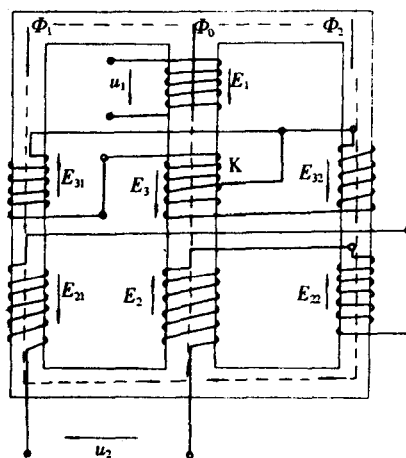


图 8-6 电势方向图

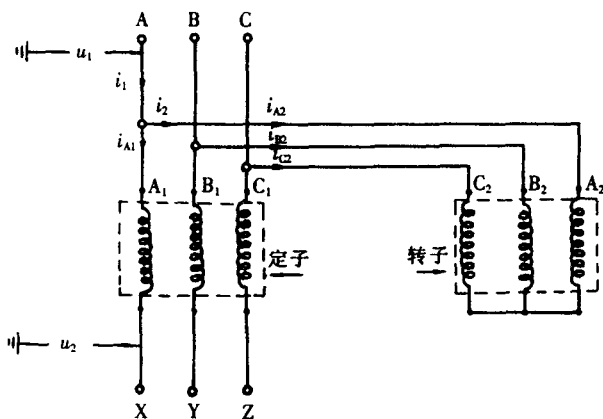


图 8-7 感应调压器接线图

空间旋转磁通，并在定子绕组中感应电势 (E_2)。

调压器的输出电压 u_2 由电源电压 u_1 和感应电势 E_2 合成。当改变转子的空间相位时, E_2 的相位改变, 因而输出电压的幅值也改变。这种变化关系, 用图 8-8 说明。

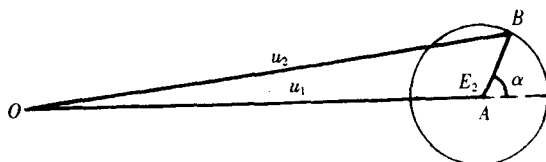


图 8-8 调压器输出电压

由图可知: OA 表示 u_1 , OB 表示 u_2 , AB 表示 E_2 , α 表示转子的空间相位。在 $\alpha=0$ 时, u_1 和 E_2 同相位, u_2 的幅值最大; 在 $\alpha=180^\circ$ 时, u_1 和 E_2 的相位相反, u_2 的幅值最小。 u_2 的数值为:

$$u_2 = \sqrt{u_1^2 + E_2^2 + 2u_1E_2\cos\alpha} \quad (8-9)$$

当 u_1 和 E_2 的幅值相同时,

$$u_2 = \sqrt{2u_1^2 + 2u_1^2\cos\alpha} = \sqrt{2} u_1 \sqrt{1 + \cos\alpha} \quad (8-10)$$

所以说: 感应调压器的调压范围是“ $0 \sim 2u_1$ ”。

该调压器的输出电压波形较好。能量通过 i_1 和 i_2 传送。其中, i_1 是电传导方式传送, i_2 是磁耦合方式传送。

4 电源发电机

试验用电源发电机是同步发电机。试验要求它输出电压稳定、电压波形为正弦波、功率因数 $\cos\varphi$ 较小。在结构上, 它包括转子、定子和励磁系统。在容量上, 要求它能满足试品的要求。

发电机的转子由转子铁心、励磁绕组和阻尼绕组组成。当励磁绕组通过电流, 它就会在空间产生旋转磁场, 在定子绕组中感应电势, 同时在发电机的输出端输出电压。励磁绕组流过的电流, 称为励磁电流 i_0 ; 励磁电流产生的磁通, 称为主磁通 Φ_0 ; 主磁通在定子绕组感应的电势, 称为主电势 E_0 。励磁电流和主电势的关系, 称为空载特性, 即 $I=0$ 时, $u=E_0=f(i_0)$, 其中 I 是定子绕组的电流。

空载特性是发电机的重要特性, 并且是非线性关系表示的特性。因为励磁电流增大时, 磁路出现饱和现象, i_0 和 u 就会出现非线性关系。

发电机的定子由定子铁心和定子绕组构成。其中, 定子绕组包括 A 相绕组、B 相绕组和 C 相绕组。三个绕组的空间位置相差 120° , 因而其感应电势在时间(相位)上也差 120° 。

流过定子绕组的电流 I 产生定子磁通。定子磁通的一部分与定子绕组交链, 称为漏磁通 Φ_l 。定子磁通的另一部分, 通过定子与转子之间的气隙, 在空腔中形成旋转磁场, 称为电枢反应。

电枢反应分直轴电枢反应 Φ_{ad} 和横轴电枢反应 Φ_{aq} 。直轴电枢反应由垂直于主电势 E_0 的电流分量 I_d 产生。当 I_d 超前 E_0 90° 时, Φ_{ad} 和 Φ_0 同相位, Φ_{ad} 感应的电势 E_{ad} 与 E_0 也同相位, 使发电机的端电压 u 升高; 当 I_d 滞后 E_0 90° 时, Φ_{ad} 与 Φ_0 反向, Φ_{ad} 感应的电势 E_{ad} 和 E_0 反向, 使发电机的端电压降低。

横轴电枢反应 Φ_{aq} , 由与主电势 E_0 同向的电流分量 I_q 产生, 所以 Φ_{aq} 感应的电势 E_{aq} 滞后于 E_0 90° , 使发电机的端电压滞后于 E_0 , 并产生幅值变化。

发电机的总电势 E , 由主电势 E_0 和电枢反应电势 E_{ad} 、 E_{aq} 合成, 并可表示为:

$$E = E_0 + E_{ad} + E_{aq} \quad (8-11)$$

发电机的端电压 u 和总电势 E 有关, 同时也与定子绕组的电阻 R 和定子绕组的漏抗 X_l 有关。它们之间的矢量关系见图 8-9、图 8-10。

图中, φ 是发电机端电压 u 和定子绕组电流 I 之间相位差, 由发电机的负载阻抗决定; θ 是发电机主电势 E_0 和发电机端电压 u 之间的相位差, 由发电机输出的有功功率 P 决定; ψ 是主电势 E_0 和定子电流 I 之间的相位差, 由 φ 和 θ 决定, 即:

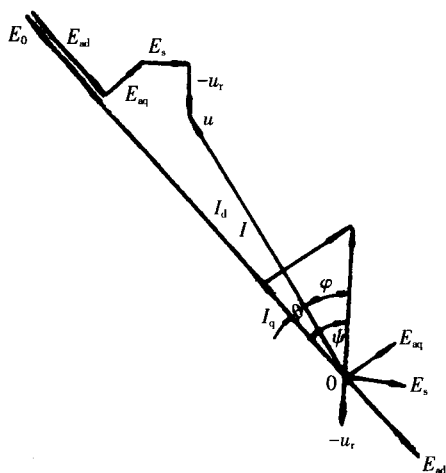


图 8-9 电流滞后于电势 E_0 的矢量图

$\psi = \theta + \varphi$ 。在 $P=0$ 时, $\theta=0$, $\psi=\varphi$ 。

电枢反应电势 E_{ad} 和 I_d 的关系, E_{aq} 和 I_q 的关系, 常用表达式表示, 即:

$$E_{ad} = -jX_{ad}I_d \quad (8-12)$$

$$E_{aq} = -jX_{aq}I_q \quad (8-13)$$

并且令:

$$E_s = -jX_s I \quad (8-14)$$

$$E_d = E_{ad} + E_s \sin \psi = -jI_d X_{ad} - jI_d X_s = -jI_d (X_{ad} + X_s) = -jI_d X_d \quad (8-15)$$

$$E_q = E_{aq} + E_s \cos \psi = -jI_q X_{aq} - jI_q X_s = -jI_q (X_{aq} + X_s) = -jI_q X_q \quad (8-16)$$

式中 X_s ——定子绕组漏抗, Ω ;

X_{ad} ——直轴电枢反应电抗, Ω ;

X_{aq} ——横轴电枢反应电抗, Ω ;

X_a ——直轴电抗, Ω ;

X_q ——横轴电抗, Ω 。

由于对应的电枢反应电抗相等 ($X_{ad}=X_{aq}$)。所以, 直轴电抗和横轴电抗相等 ($X_d=X_q$)。隐极式发电机的稳态量值关系可用图 8-11 表示。

图 8-11 中 Z 是发电机负载阻抗。当 Z 是容性时, $0 < \varphi \leq 90^\circ$; 当 Z 是感性时, $0 > \varphi \geq -90^\circ$ 。

三相发电机输出的有功功率 P 和无功功率 Q 可用下式表示:

$$P = \frac{3uE_0}{X_d} \sin \theta \quad (8-17)$$

$$Q = \frac{3u(E_0 \cos \theta - u)}{X_d} \quad (8-18)$$

由上式可知: 高电压试验用发电机, 有功功率 P 很小, 可认为 $P \approx 0$ 。因而, 可认为 $\theta \approx 0$, $\psi = \varphi$ 。并且, 在试品为纯容性试品时, 发电机的负载阻抗是纯电容, 发电机的等值电路就可用图 8-12 表示。

图 8-12 中 I 超前 E_0 90° (因 $\theta=0$); C_x 是试验用变压器和试品的合成电容。根据图 8-12 中关系, 可以分析发电机的端电压升高 ($u > E_0$)、发电机的串联谐振和发电机的自激现象。

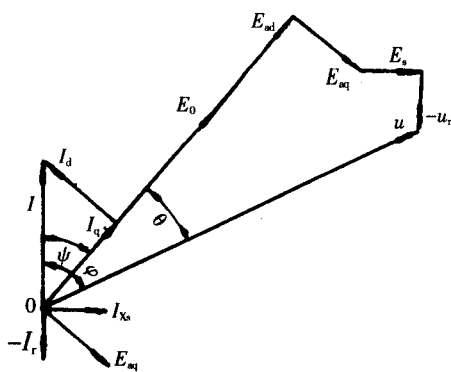


图 8-10 电流超前电势 E_0 的矢量图

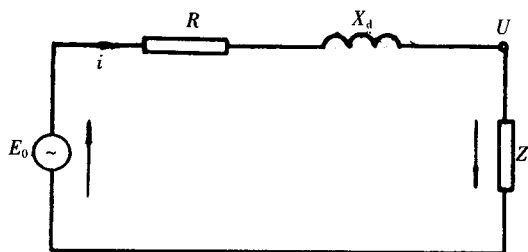


图 8-11 隐极式发电机等值电路图

(1)发电机的端电压升高:发电机的负载是容性阻抗,并 $X_c > X_s$ 时,发电机的定子电流超前主电势 E_0 ,端电压升高($u > E_0$),并可以用下式表示:

$$u = E_0 + jX_{ad}I + jX_s I \quad (8-19)$$

(2)发电机回路的串联谐振:在发电机的负载是容性阻抗,且 $X_c = X_s$ 时,发电机的定子电流猛增,端部电压猛增,产生串联谐振。

(3)发电机自激及自激电压:在发电机的负载是容性阻抗时,发电机的端电压会自动升高,出现自激现象。

发电机自激,通常指的是发电机励磁电流为常数(或 $i_B=0$)时,发电机端的电压自动升高,并达到数值很大的稳定电压 u_y 。稳定电压的数值与发电机的气隙磁通有关,同时也与发电机回路的参数有关。回路参数包括负载阻抗 X_c 和发电机漏抗 X_s 。

为了认识发电机的自激现象,首先要认识发电机的总磁通、总电势和总电压降。在稳态时,它们的关系可表示为:

$$\Sigma E = \Sigma u \quad (8-20)$$

$$\Sigma E = E_0 + E_{ad} + E_{aq} \quad (8-21)$$

$$\Sigma u = jX_s I - jX_c I = -j(X_c - X_s)I \quad (8-22)$$

令 ΣE 的稳态值为 E_y , Σu 的稳态值为 u_y , I 的稳态值为 I_y ,这时就可以把发电机的稳态关系表示为:

$$E_y = u_y$$

$$I = I_y$$

再者,在发电机的励磁电流是常数时,旋转磁通就只与定子电流有关。因而,总电势 ΣE 就只与定子电流有关,并要用饱和曲线表示,见图8-13。

图8-13中:“1-2-3”曲线,代表 ΣE 和定子电流的关系。其中, ΣE 中含 E_0 , E_0 由“0-1”段表示。

图8-13中,“0-4-5-3”曲线,代表 ΣE 和定子电流的关系,其中, ΣE 不包含 E_0 ,也不包含剩余磁通产生的电势。

发电机回路的电压降 Σu 和定子电流有关,两者是直线关系(见式8-22),用图8-13中“0-6”直线表示。

根据图8-13所示的关系,可知发电机的稳定工作点是直线和曲线的交点,因为在此点才能满足 $E_y = U_y$ 的工作关系。根据这种工作关系,可作出以下推断。

(1)根据直线的斜率($X_c - X_s$),可以推断稳定工作点的电流大小,即:当试品电容大,对应的 X_c 值小,直线的斜率小,稳定工作点的电流值大,自激过电压高;否则,直线斜率增大,稳定工作点的电流小,自激过电压低;当发电机开路或负载电容小时,发电机就不会出现自激,不会出现端电压升

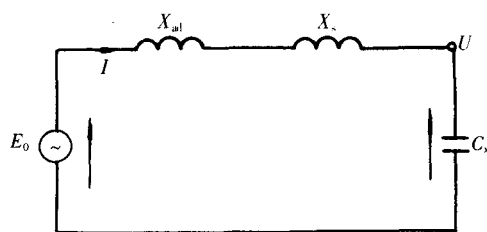


图 8-12 发电机等值电路图

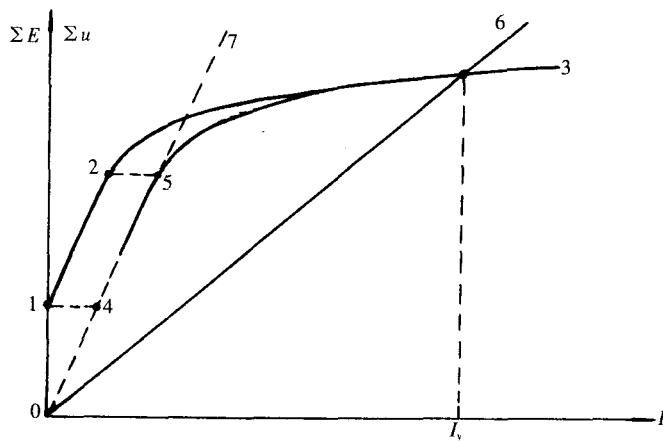


图 8-13 总电势与定子电流的关系

高。

(2)在通常的分析中,常不计主电势 E_0 ,或不计主磁通,不计剩余磁通。这时就要按图 8-13 中“0-4-5-3”曲线分析。由此可知:直线和曲线在原点($i=0$)相切时,发电机的 ΣE 和 Σu 相等,定子电流不会自动增大,就不会产生自激现象。这时的阻抗关系为:

$$X_c \geq X_s = (X_{ad} + X_s) \quad (8-23)$$

(3)根据曲线和直线的相互关系,还可以推断自激现象的发展过程。在发电机合闸后,产生定子电流,进而产生电枢反应,产生 E_{ad} 。 E_{ad} 使 Σu 增大,进而又使定子电流增大, ΣE 增大……经过逐步发展,定子电流达到稳定值, $E_s = U_y$ 。这就是自激发展过程。自激的发展过程可以被人觉察,可以看到试品端电压的自动升高。

为了防止自激现象产生,要求对发电机进行电感补偿,使发电机的电流减到最小值。

试验用的发电机应该有使用导则。在使用导则中规定 X_c 的计算方法,即电感补偿方法。例如,原沈阳变压器有限责任公司的 2250kV 工频电压设备就有补偿方法说明,即:

(1)计算试品的电容电流值(高压侧):

$$I_1 = u\omega C$$

(2)计算试验变压器的原边电流值:

$$I_2 = kI_1 + I'_c$$

式中 k ——试验变压器的变比;

I'_c ——设备分压器和杂散电容增加的电容电流, A。

I'_c 的计算方法为:

$$\text{在 3 台串联级运行时, } I'_c = \frac{u}{2250} \times 0.45, \text{ A}$$

$$\text{在单台运行时, } I'_c = \frac{u}{750} \times 0.19, \text{ A}$$

(3)在发电机单相运行、输出电压 6300V 和电流 $I_2 > 200\text{A}$ 时,对发电机要进行补偿。

再者,对发电机的单相运行方式亦要作些说明。发电机单相运行,属于不平衡运行方式。发电机单相运行,有三种接线方式,见图 8-14 中的(a)、(b)和(c)。

图 8-14(a)是一个相绕组供电的接线图。图 8-14(a)中的发电机中性点接地,由 A 相绕组供电。发电机的输出电流,等于 A 相定子绕组电流;发电机的电枢反应产生电势 $E_{ad}(A)$;发电机的总电势等于主电势 $E_0(A)$ 和电枢反应电势 $E_{ad}(A)$ 的矢量和; $E_{ad}(A)$ 和 $E_0(A)$ 同相位,所以发电机的端电压:

$$u = E_0(A) + E_{ad}(A) + jX_s(A)I \quad (8-24)$$

式中, $X_s(A)$ 为 A 相绕组的漏电抗。

图 8-14(b)是两相绕组串联供电的接线

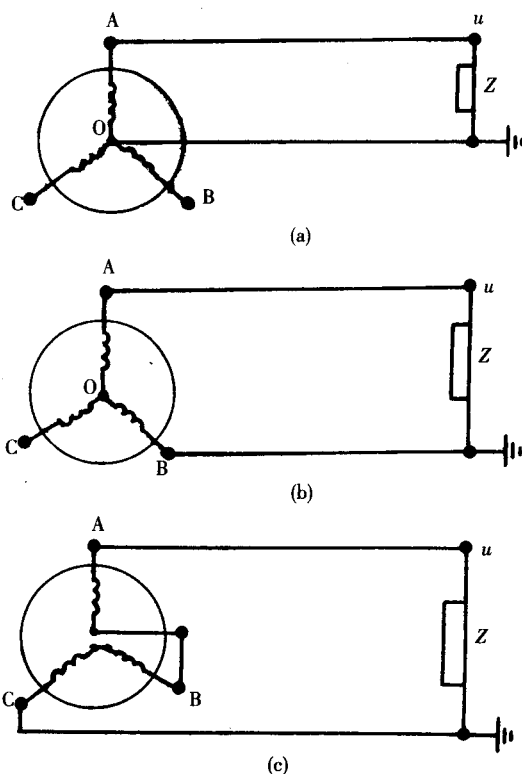


图 8-14 发电机供电接线图

(a)单相绕组供电接线图 (b)两相绕组串联供电接线图
(c)三相绕组供电接线图

图。图 8-14(b)中的发电机中性点不接地,带电运行;负载接至 A 相和 B 相的出线端,由两相供电。所以,发电机回路中的主电势是 A 相和 B 相的合成,即:

$$\Sigma E_0 = E_0(A) - E_0(B) = \sqrt{3} E_0(A) < 30^\circ \quad (8-25)$$

由于发电机输出的电流经过 A 相和 B 相,所以发电机的电枢反应磁通 $\Phi_d(2)$ 是由 A 相和 B 相的电流产生,因而电枢反应磁通 $\Phi_d(2)$ 和主磁通的空间相位不相同。因而,电枢反应磁通 $\Phi_d(2)$ 在 A 相和在 B 相感应的电势为 $\Sigma E_d = E_d(A) - E_d(B)$ 。又因为两相绕组产生的电枢反应磁通 $\Phi_d(2)$ 大于一相电枢反应磁通 $\Phi_d(1)$,所以,电枢反应对应的电抗 $X_d(2)$ 也大于一相绕组供电时的电抗 $X_d(1)$ 。

图 8-14(c)是三相绕组供电的接线图。图 8-14(c)中的中性点连接线是解开的,并都不接地;A 相和 B 相是正向串接,B 相和 C 相是反向串接;负载接在 A 相和 C 相的出线端。

发电机的主电势,等于三相主电势和,即:

$$\Sigma E_0 = E_0(A) - E_0(B) - E_0(C)$$

5 电压测量方法及设备

在外施工频电压试验时,采用的电压测量方法有直接测量法和间接测量法。直接测量法是用高压测量设备直接测量试品端部的高电压,常用的测量设备是分压器或电压互感器。间接测量法是用低压测量变压器的一次侧电压或是测量第三绕组的电压。在标准中要求采用直接测量法,但在实际中却广泛地采用间接测量法,所以对有关测量设备和测量方法都要做出说明。

5.1 电压互感器

电压互感器分为标准电压互感器和通用电压互感器。两者的使用条件不同,所执行的标准也不同。标准电压互感器的准确级高,可以达到 0.01 级,被当做标准计量仪器,用于计量检定部门。通用电压互感器的准确级较低,可以达到 0.2 级,被用在日常的测量工作中。

通用电压互感器的输入阻抗很大,因而可以在高电压试验中使用。并且,准确级为 1 级的电压互感器就能够满足高电压测量要求;0.5 级的电压互感器能当做用于校正的标准仪器,可以校正分压器的指示电压。因为高电压试验的电压允许偏差是 3%,用 0.5 级互感器当标准仪器就能满足三级传递标准的要求。

用电压互感器测量高电压时,电压互感器和试品直接连接(高压端相连,接地端相连)。试品的耐受电压(试验电压),按互感器的指示电压计算。

5.2 电容分压器

电容分压器由主体电容、高压连接线和低电压指示系统组成。

其中主体电容有两个单元,其一是高压电容,其二是低压电容,两者相串联。相互关系见图 8-15。

图 8-15 中高压电容 C_1 由多个电容器串联构成,承受电压 u_1 。它的工作电压 u_1 按试验电压 u 选定;电容分压器的电容值要满足分压比要求,通常选用 C_1 为 50~100pF,但有时也采用 10pF 左右的数值。低压电容 C_2 承受电压 u_2 , C_2 和 u_2 要根据指示电压选定。当指示电压高时, C_2 值小;当指示电压值低时, C_2 值大。

高压电容 C_1 和低压电容 C_2 之和与高压电容 C_1 之比,称为电容分压比,它的表达式为:

$$K_c = \frac{C_2 + C_1}{C_1} = (1 + C_2/C_1) \quad (8-26)$$

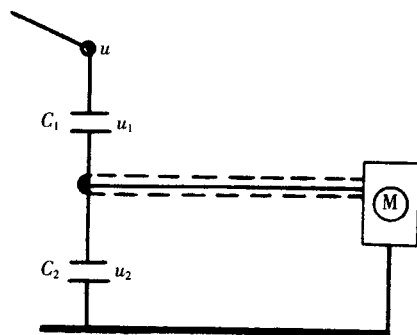


图 8-15 电容分压器示意图

但是,计算出的电容分压比不等于实际分压比。两者存在差别,其原因是:

(1)分压器使用的电容器有绝缘电阻,其电阻分别用 R_1 和 R_2 表示,绝缘电阻会影响实际分压比。当 $C_1R_1=C_2R_2$ 时,电容比等于电阻比,电阻比不影响实际分压比。但是, $C_1R_1 \neq C_2R_2$ 时,电容比不等于电阻比,电阻比就会影响实际分压比。并且, u_1 和 u_2 的相位也不相同。

(2)高压连接线和主体电容之间存在附加电容。这个电容会影响实际分压比。所以,高压连接线的长短和连接方式要保持不变,并且在工作电压下也不应出现电晕放电。

(3)低压指示系统会给低压电容增加附加电容,使实际分压比变化。

基于以上原因,实际分压比就不能用计算方法得出,而必须用比对试验方法得出。并且,对电容分压器还要进行指示线性度试验、指示不确定度试验和邻近效应试验,以保证分压器的指示稳定。分压器的指示值,采用峰值除以 $\sqrt{2}$ 的数值记录。

在使用分压器时,要在使用之前对它进行检查试验。检查它的指示数据,确认指示是否正确。并且,要定期进行比对试验,保证指示准确。

5.3 试验变压器一次侧电压表法

额定电压较低的试验变压器(如 250kV 以下),电源电压采用 220V 或 380V,高电压的测量方法常采用一次侧电压表法。这种测量方法简单,但其电压指示会随着试品电容变化,引入测量误差。所以,对原方电压表指示要按试品进行校正。

一次侧电压表的指示比例,在变压器空载时等于匝数比(或额定电压比),用 K 表示。此时 $u_2' = K \cdot u_1$ 。但是,在负载时,它的指示比例就不能用 K 表示,因为当试品是容性负载时,变压器的输出电压升高,一次侧电压和输出电压的比值增大,这种关系可用图 8-16 说明。

式中 K ——变压器的匝数比(或额定电压比)。

C_x 在 u_2 作用下的电流为:

$$i_2 = j\omega C_x u_2 \quad (8-27)$$

式中, $\omega = 2\pi f \approx 314$, 称为角频率; C_x 的单位取 F; u_2 的单位取 V, 电流的单位取 A。在忽略励磁电流的条件($i_0=0$)下, $Z_m = \infty$, $i_1 = i_2 = i$, $X_{s1} + X_{s2} = X_s$, X_s 称为变压器漏抗。

$$X_s = \frac{U_H}{I_H} u_k \% \quad (8-28)$$

式中 $u_k\%$ ——变压器的短路电压百分数;

u_H ——变压器的额定电压(二次侧), V;

I_H ——变压器的额定电流(二次侧), A。

漏抗的电压降为:

$$\Delta u = jI_2 X_s = -\omega C_x X_s u_2 \quad (8-29)$$

输入电压和输出电压的数值关系为:

$$u_2 = \frac{K \cdot u_1}{1 - \omega C_x X_s} \quad (8-30)$$

输入电压和输出电压的矢量关系,用图 8-17 表示。

此时试验变压器的电压比增大为额定电压比 K 的 K' 倍。即负载电压比变为 $K' \cdot K$ 。

$$K' = \frac{1}{1 - \omega C_x X_s} \quad (8-31)$$

变压器在容性负载时的输出电压升高,称为电压容性升高。并且,试品电容大时,电压升高得

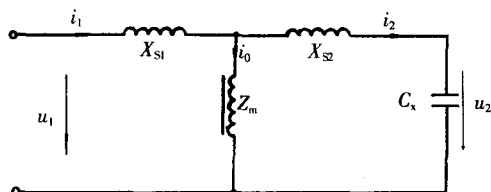


图 8-16 变压器等值电路

u_2 —变压器的输出电压,即试品的端电压 C_x —试品的等值电容 X_{s1} —变压器一次侧绕组漏抗 X_{s2} —变压器二次侧绕组漏抗 Z_m —变压器的励磁阻抗

多(百分数);试验变压器的漏抗大时,电压升高得多。所以,串联试验变压器会使电压升高得更多。例如:原沈阳变压器有限责任公司的1500kV三级串试验变压器,设计匝数比是555,安装后的空载(没有接试品)电压比为750,二次侧电压升得非常明显。

所以,对一次侧电压表的指示要进行高电压校正,并且要在接入试品的条件下校正。

5.4 试验变压器的第三绕组测量法

250kV以下的试验变压器中,多数采用第三绕组测量法。该方法用变压器的第三绕组(测量绕组)电压指示高电压,并按匝数比对指示电压进行分刻度。但是,这种测量方法仍存在容性试品电压升高的现象。所以,它的指示电压也不能单纯地用匝数比 K 计算,也必须结合实际试品进行校正。

高电压和第三绕组电压的关系,可以用三绕组变压器的等值电路表示出来,见图8-18。

图8-18中 u_1 和 u_3 都是折合到高压侧的电压; $i_2=j\omega C_s u_2$;在第三绕组只接仪表时,仪表阻抗大, $i_3 \approx 0$ 。所以, u_3 和 u_2 之间的电压差为: $\Delta u = jX_{s2}i_2$ 。这个电压差,在实际试验时不能忽略,应按试品进行校正。

5.5 高压测量设备的检查和校正

在使用高压测量设备时,应把高压测量设备当成是一个测量系统,不能只把它当成是一个测量仪表。因为它由多个部件组成,并有高压连接线和低压连接线。并且,由于设备体积大,周围物体对它有影响,所以,对它要进行性能试验和校正试验,确保它的电压指示正确。

对新购置的高压测量设备,首先应按合同检查其部件是否齐全,然后按标准GB/T16927.2—1997检查其出厂试验项目是否齐全,出厂试验报告是否有效。进而对它进行验收试验,比较出厂试验和验收试验的数据,确认其符合要求后才可使用。

对在用高压测量设备,要定期(约一年)进行检查试验和校正试验,以证明它的电压指示是正确的。并且,在试品试验之前,要对测量设备的电压指示进行检查,证明现在的电压指示也是正确的。对于检查试验和校正试验的方法,作以下说明。

5.5.1 指示线性度的试验方法

指示线性度试验是指求出被校设备的高电压和指示电压的关系,即 $u=f(V)$ 。式中 u 是被校设备的高电压, V 是被校设备的指示电压。在工作电压范围内,两者是线性关系时,证明测量设备的分压比是常数;不是线性时,证明分压比不是常数。但是,如何证明被校设备的指示是否为线性呢?没有统一的试验方法。例如:使用被认可的测量设备,用比对试验方法,取两套测量设备的指示电压 V_1 和 V_2 ,求出两者的比例关系, $V_1=f(V_2)$ 。进而根据 $V_1=f(V_2)$ 的线性关系说明被校设备的线性度。或者,没有使用被认可的测量设备,而是把一次侧电压表指示当作标准(认为试验变压器的磁化曲线是在直线段工作),这时 V_1 和 V_2 的关系 $V_1=f(V_2)$ 若是直线,证明被校设备的指示是线性的;若不是直线关系,则还要用被认可的测量设备进行比对试验。

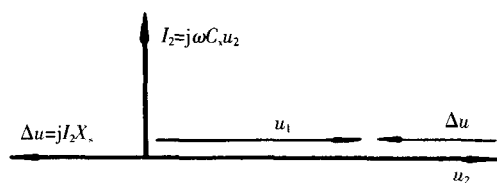


图 8-17 输入电压和输出电压矢量关系图

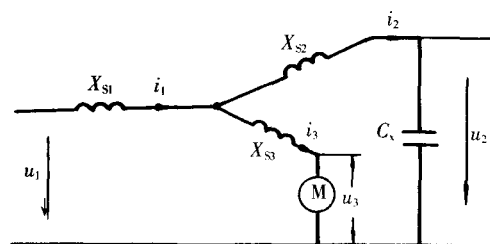


图 8-18 三绕组变压器的等值电路

5.5.2 电压指示不确定度的试验方法

电压指示的不确定度,是指用数值相同的高电压 u 对被校设备进行多次试验(如 20 次),求出指示方差 S ,用 $2.5S$,或 $3S$ 表示。其中, S 的计算为:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - V_0)^2} \quad (8-32)$$

式中 n ——测量次数;

V_i ——每次测量值, V ;

V_0 —— n 次测量平均值, V 。

如何选定高电压值? 这要根据测量设备的工作电压选定。一般讲,选 1~2 个工作电压点即可。

5.5.3 邻近效应试验

邻近效应试验是判定周围物体对测量设备的影响,并给出测量设备的正常工作距离。

试验时,首先要选定三个试验距离。其中,第一个试验距离是安全工作距离,等于或大于测量设备的高度;第二个试验距离是第一个的 1.5 倍;第三个试验距离是第一个的 2.0 倍。试验后,对三个距离的指示电压进行比较,确定测量设备的工作距离。

在三个试验中,施加的高电压不变,设备的高压接线和接地线不变,指示系统不变,只改变周围物体到试品的距离。每个试验距离施加的高电压次数,取 10 次,并取平均值进行比较。

5.5.4 比对校正试验方法

所谓比对校正试验方法,就是用两套测量设备(其中,一套是已被认可的测量设备,另一套是要求校正的测量设备),同时测量一个电压。测量之后,比较两套设备的测量数据,用已被认可的测量设备数据给要求校正的设备标定刻度。这样的校正方法,符合我国的计量法规,也符合高电压试验标准。因为在国标 GB/T16927.1—1997 中说明:高电压测量以球隙放电电压为准,而这种校正方法就是比对校正试验方法。

在比对试验时,可以作为高电压标准的设备有:高电压互感器、放电球隙和已被认可的测量设备。其中高电压互感器要符合相应的性能标准,并通过型式试验和例行试验;要有一定的准确级,可以给出测量误差;可以满足高电压测量的要求(偏差不大于 $\pm 3\%$)。

已被认可的测量设备,就是经过比对试验并得到认可的测量设备。这些设备的指示偏差都小于 $\pm 3\%$ 。这些设备可以是分压器测量系统,也可以是变压器的一次侧电压表。

把球隙放电电压作为高电压标准,是法定的,也是常用的。要严格执行国标 GB311.6—1983,否则就要产生较大误差,产生错误。

为了正确地执行标准规定,请注意以下五点,即:

(1) 根据测量电压的波形和数值,选择放电球的直径 D 和球隙 S ,并使 $\frac{S}{D} < 0.5$ 。放电球隙的电场是较均匀电场,故不能使 $\frac{S}{D} \geq 0.5$,否则放电分散性增大,测量误差增大。但是,球隙也不宜太小,太小时的放电分散性也会增大,并容易引入间隙尺寸误差。使用球隙放电方法时,还要注意测量数据的分散性,当发现分散性增大时,要增加试验次数,或改变使用条件。球隙的放电电压值,既与球隙尺寸有关,也与球径有关。所以球隙和球径的尺寸配合要有最佳比例,如: $\frac{S}{D} = 0.10 \sim 0.40$ 。按标准规定,球径的尺寸有:2、5、6.25、10、15、25、50、75、100、150 和 200cm。与球径对应的放电间隙和放电电压值(即:在标准大气压条件下的放电电压值)在国标 GB311.6—1983 中给出。由标准可知:球隙的

放电电压值与电压波形有关,与电压极性有关。所以,使用球隙放电电压数据表时,要明确所测的电压类别(直流电压、交流电压或冲击电压)和电压的极性(正极性或负极性),并且冲击电压的持续时间要大于1μs。

(2)根据放电球的直径,选定放电球的安装位置。为了避免周围物体及地平面对球隙电场的影响,要求放电球极的安装高度符合标准规定,球极到周围物体的距离符合标准规定。有关规定数据见表8-3。

(3)根据球隙放电时的大气条件,校正球隙的放电电压。在标准中给出的放电电压值和标准大气条件对应。但在实际试验时的大气条件和标准大气条件不同,球隙的实际放电电压也和标准规定值不同,故要进行校正才能得到实际放电电压值。校正计算公式为:

$$u=KU_H$$

(8-33)

式中 U_H ——在标准大气条件下的放电电压,查表得出,kV;

u ——在实际大气条件下的放电电压,计算得出,kV;

K ——大气条件校正系数。

在确定校正系数 K 的数值时,只计入空气相对密度 δ ,不计入空气湿度。校正系数和空气相对密度的关系,见表8-4。

表8-4中的空气相对密度计算公式为:

$$\delta=\frac{b}{101.3}\times\frac{273+20}{273+t}=2.89\times\frac{b}{273+t}$$

式中 b ——试验场地的实际空气压力,kPa;

t ——试验场地的实际空气温度,℃。

为了便于查出 U_H 的数值,将标准中的部分数据抄录于表8-5。

(4)在选定球隙放电电压时,球隙的放电电压不得高于试验耐受电压的85%。

(5)在使用球隙放电方法测量工频电压时,还要有球极串接保护电阻,以限制过电压和过电流。保护电阻的取值,可按1V1Ω计算;保护电阻的长度(在结构上的长度),要按间隙放电电压计算。

6 过电压保护设备

在工频电压试验时,设备可能产生过电压和过电流。所以,对试验设备和试品要加装必要的保护装置。在目前,常用的保护装置有:球间隙、试品保护电阻、避雷器、控制开关和接地保护。并且,还要遵守合闸电压、跳闸电压、开断时间等规定。

6.1 球间隙保护

球间隙可以限制设备的端部过电压——对地过电压,但不能限制绕组之间的传递过电压。使用球极保护时,在球极的高压端要串接保护电阻。然后,把带电阻的球间隙并接在试品的两端,以

表 8-3 球极到地平面及周围物体的距离

球极直径/cm	A(最小值)	A(最大值)	B(最小值)
6.25 以下	7D	9D	14S
10~15	6D	8D	12S
25	5D	7D	10S
50	4D	6D	8S
75	4D	6D	8S
100	3.5D	5D	7S
150	3D	4D	6S
200	3D	4D	6S

注:A—高压球的放电点到地平面的距离;
B—高压球的放电点到周围物体的距离;
S—球间隙尺寸;
D—球极直径。

表 8-4 空气相对密度对应的电压校正系数

空气相对密度 δ	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
电压校正系数 K	0.72	0.77	0.82	0.86	0.91	0.95	1.00	1.05	1.09	1.13

表 8-5 球隙放电电压

球隙距离 /cm	在不同球直径下的球隙放电电压(峰值)/kV						球隙距离 /cm	在不同球直径下的球隙放电电压(峰值)/kV					
	12.5cm	15cm	25cm	50cm	75cm	100cm		12.5cm	15cm	25cm	50cm	75cm	100cm
1	31.7	31.7	31.7				10	(195)	(209)	244	263	265	266
1.2	37.4	37.4	37.4				11		(219)	261	286	290	292
1.4	42.9	24.9	42.9				12		(229)	275	309	315	318
1.5	45.5	45.5	45.5				13			(289)	331	339	342
1.6	48.1	48.1	48.1				14			(302)	353	363	366
1.8	53.5	53.5	53.5				15			(314)	373	387	390
2	59	59	59	59	59		16			(326)	392	410	414
2.2	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5		17			(337)	411	432	438
2.4	70	70	70	70	70		18			(347)	429	453	462
2.6	75	75.5	75.5	75.5	75.5		19			(357)	445	473	486
2.8	80	80.5	81	81	81		20			(366)	460	492	510
3	85	85.5	86	86	86	86	22				489	530	555
3.5	97	98	99	99	99	99	24				515	565	595
4	108	110	112	112	112	112	26				(540)	600	635
4.5	119	122	125	125	125	125	28				(565)	635	675
5	129	133	137	138	138	138	30				(585)	665	710
5.5	138	143	149	151	151	151	32				(605)	695	745
6	146	152	161	164	164	164	34				(625)	725	780
6.5	(154)	161	173	177	177	177	36				(640)	750	815
7	(161)	169	184	189	190	190	38				(655)	(775)	845
7.5	(168)	177	195	202	203	203	40				(670)	(800)	875
8	(174)	(185)	206	214	215	215	45					(850)	945
9	(185)	(198)	226	239	240	241	50					(895)	1 010

注:1.本表所列数据是破坏性放电电压;

2.大气参考条件为 20℃和 101.3kPa;

3.本表适用于:交流电压;负极性的标准全波冲击电压;两种极性的直流电压;

4.本表不适用于测量 10kV 以下的冲击电压;

5.括号内数字是球间距离大于 0.5D 的数据。

限制试品的过电压。球间隙的实际放电电压 u 要高于试品的试验电压 u_H ,两者的差值 $\Delta u=0.15u_H$ 。

在选定间隙尺寸时,要明确球间隙的放电电压是用幅值表示,还是用方均根值表示。因为,试品的耐受电压是用方均根值表示,所以,球间隙的放电电压也得用方均根值表示。在使用球间隙时,要按国标 GB311.6—1983 规定的安装条件和大气条件校正。在选取球的保护电阻时,电阻值要基本符合 $1V/\Omega$,电阻的结构长度要满足在试品击穿时不出现沿面闪络(按空气绝缘计算电阻的结构长度)。试品的保护间隙,还可以用电场均匀的环状间隙代替,但不能用棒—板间隙或棒—棒间隙替代,因为电场不均匀的间隙放电会重燃,会提高过电压倍数。

6.2 试品的保护电阻

试品的保护电阻是串接在试验变压器和试品之间的电阻。它可以限制过电压,亦可以限制过电流。保护电阻的结构可以是金属电阻结构,亦可以是水电阻结构。保护电阻的阻值,通常是几十千欧姆,或更大一些。保护电阻的结构长度,按试验变压器的最高试验电压选定,或按试品试验电

压选择。在试品闪络放电时,保护电阻的表面不得产生闪络放电;在试品耐压时,电阻的温度应低于 60℃,水电阻的水不得沸腾。

6.3 避雷器

避雷器用于限制低压绕组、平衡绕组和传递绕组的过电压。它并接在绕组的出线端。它的放电电压或保护水平,等于各自绕组的绝缘水平(或试验电压幅值)。该项保护用于限制绕组出线端间的过电压,不能用于高压端的保护。在实际中,低压绕组的过电压倍数大于高压端的过电压倍数,故低压绕组的过电压保护应加以重视。

6.4 操作开关

操作开关既控制设备运行,也限制设备过电压。在操作时,要求它的动作快,及时合闸,及时跳闸,不重燃,不拒动,不误动。在操作过程中,如果开关重燃,操作过电压就增高,并且重燃次数越多,过电压倍数越高。

在操作时,开关拒绝跳闸,更会使放电过电压升高,过电流增大,引起试品破坏。所以,在高压设备中,要配备两套操作开关,把一套开关装在调压器前,把另一套开关装在调压器后。

6.5 接地保护

在高电压试验中,接地保护至关重要,不能轻视,更不能忽视。如果接地不当,试验场地的地电位升高,跨步电压增大,可能使试验设备和仪器损坏。例如:在瓷串试验的一次闪络时,闪络电压 1100kV,引起地电位升高,使吊挂瓷串的吊车起动(磁力开关吸合);在另一次闪络时,地电位升高,又使试区附近的“砂轮”起动。由此可见,工频闪络电压也会使地电位升高。所以,在工频电压试验时,要考虑试品击穿的可能性,要根据试品击穿的条件设计试区的接地网(接地电阻小于 1Ω),并使试验设备、试品和测量仪器能够就近接地。并且,对低压电源要加装过电压保护(如压敏电阻);对试区的接地电阻要定期(如 2 年)测量,并存档备查。

第四节 试验及试验结果

试验要考虑试验条件、试验方法和试验结果。试验条件要符合实际,试验方法要符合标准,试验结果要正确,试验报告要有效。因而要作以下说明。

1 被试变压器的绝缘

变压器外施耐压试验的绝缘,是变压器的主绝缘,并且是以下部位的绝缘:

- (1)高压绕组对低压绕组;
- (2)高低压绕组对铁心;
- (3)高低压绕组对油箱;
- (4)高低压绕组端部对压板;
- (5)高低压绕组端部对压钉;
- (6)高低压套管之间及高低压套管对油箱;
- (7)分接开关及其引线对油箱。

这些部位的绝缘结构不相同,电场分布不相同,并且绝缘介质也不完全相同。所以,它们的起始放电和放电发展不相同,放电现象和对应的放电量不相同。在油浸变压器中就有以下差别:

对于部位(1),是同心圆筒形,油屏障绝缘结构,电场分布均匀。但是,绝缘垫块畸变电场成为绝缘弱点。当产生放电并沿着垫块发展,就会使第一个油间隙击穿,并且垫块表面容易积存异物,使起始放电电压降低。该部位的电场比较均匀,故起始放电量较大,约 2 000pC;间隙击穿,可听到放电声,放电量可达 20 000pC 以上。但是,电压指示仪表却反应不明显。

部位(2)的情况和部位(1)基本相同。

部位(3)是圆柱对平板形,电场较均匀,也很少产生放电。

部位(4)是绕组的端绝缘,电场不均匀,绝缘结构复杂,容易产生放电。该部位的放电原因很多,可能是因为绝缘设计不当、制造工艺不到位、绝缘内部存在气泡或夹层、绝缘表面有异物和绝缘装配不到位引起的。部位(4)最易出现工艺性放电,这种放电起始放电电压低,起始放电量少(几十 pC 至几百 pC),经过工艺处理或增加停放时间就会消失;绝缘夹层放电,起始放电量大,可达 3 000~10 000pC;绝缘表面异物放电,起始放电量大,并且不稳定(因为异物在电场力作用下会产生小的变位)。在绝缘接合的部位,会产生油角放电,放电量较大,在 10 000pC 以上。

部位(5)的压钉处,电场集中,是绝缘弱点。

部位(6)的放电部位在套管内部,或套管引线对升高座。套管的耐受电压情况和放电量在变压器耐压试验之前是知道的,并确认达到要求。

部位(7)放电部位是开关主绝缘或其引线绝缘。由于引线多,情况复杂,该部位的起始放电常在引线夹件处,或在导线之间的油隙中,放电量较大。开关的耐受电压情况和放电量,在变压器耐压试验之前是已知的,并得到确认。

在干式变压器中,其绝缘和油浸变压器的绝缘不同。它的放电部位是空气绝缘或是固体在空气中的绝缘或是绕组导线周围的固体绝缘。它的起始放电决定于电极形状和制造工艺,起始放电量可以低于 10pC。火花放电是由于绝缘配合不当引起电场集中,产生局部间隙击穿或沿面放电。并且,干式变压器的绝缘和大气条件有关。在结构上,端部绝缘的弱点多,它的绝缘既与工艺有关,又与绝缘件的组合有关,与铁心夹件或压钉也有关。干式变压器的起始放电是气体放电,即固体绝缘在空气中的沿面放电,固体绝缘内部的气泡放电。因为一个放电部位在半波电压下的放电脉冲只有两个,并且幅值相等,所以,根据半波电压内的局部放电脉冲个数和幅值,可分析放电部位的多少。

2 试验结果的判断

变压器绝缘耐受电压试验的结果包括通过、没通过和出现异常现象要求复试。对试验结果的判断,要依据有关标准和试验经验及对绝缘结构的了解。国标 GB311.1—1997 第 6.2 条规定“如果在试验过程中试品绝缘没有发生破坏性放电则认为通过试验”。

国标 GB1094.3—2003 第 11 条规定:“如果试验电压不出现突然下降,则试验合格”。

对于试验结果的判断通常可采用以下判断方法:

(1)如果试验时的高电压指示和电流指示都稳定不变,并且在变压器内没有异常响声,这时就判断试品通过试验;

(2)如果试验时仪表指示都发生变化(其中,电流表指示增大或减小),并听到变压器内部有放电声,这时就判断试品没有通过试验,必要时应吊心或拆开检查;

(3)如果仪表指示变化不明显,但变压器内部出现清脆的放电声(像炒豆似的声音),这时就要根据复试的结果进行判断。当复试时放电声消失,判断试品通过试验;当复试时放电声不消失,判断试品没有通过试验,必要时应吊心或拆开检查。

对于放电的性质和部位通常可根据以下经验判断:

(1)如果高电压指示变化不大,电流表指示变化较大,并在变压器内部出现清脆的“当,当”放电声,重复试验时,仪表指示和放电响声都同前,这时可认为是油间隙放电;

(2)如果仪表指示变化不明显,但产生“哧……哧……”的放电声,这时可认为是绝缘沿面放电,或绝缘夹层放电;

(3)如果仪表指示变化大,并且是沉闷的放电声,这时可认为是器身内部产生放电。

对变压器故障进行判断,难度很大,既要有观测数据,又要有较多的实践经验,对变压器的绝缘结构和放电理论也要了解。所以,在试验时要认真观测数据,积累经验。在吊芯检查时,要认真查找,找到放电起始点和发展方向,进而分析产生放电的原因。并且要发展新的观测方法,如超声定位、色谱分析和局部放电测量等。目前,由于绝缘水平降低,耐受电压和工作电压的差值减小,所以就提出测量耐受电压下的局部放电量,用局部放电量判断试品绝缘,这有可能成为发展方向。

3 试验条件

试验的必要条件包括试验人员、试验设备和试品状态,具体如下:

(1)试验人员要明确试验任务,并分工明确,密切配合,做好各项技术工作;

(2)对试品要进行必要的检查,确认试品符合试验要求,即:

①确认试品铭牌和试验任务书(合同)一致;

②确认试品部件的装配符合试品要求;

③确认油箱的油面达到要求;

④确认套管的油面达到要求;

⑤确认试品在试验场地停放时间达到要求,例如 110kV 及以上的变压器,在注满油后的停放时间应不少于 36h,对 220kV 级产品进行真空注油,注油后的停放时间应不少于 48h,对 10kV 及以下的变压器,注满油后应静放 24h;

⑥确认绝缘检测项目都已达到要求,例如油样试验、绝缘电阻测量和介质损耗因数测量等;

⑦确认试品的排气充分,例如对于油浸变压器的穿缆套管或有放气螺钉的套管、套管升高座、人孔、手孔、低压出线盒子、电炉变压器的低压接线板等部位都要充分放气。

(3)正确地对试品进行接线,即:

①把各个绕组的首末两端短接起来(即:同一绕组首末两端相连接);

②被试绕组与高电压引线相连接;

③非试绕组直接接地;

④油箱和铁心直接接地;

⑤套管测量端子接地;

⑥套管电流互感器的二次要短接,并接地。

(4)检查试验设备,并进行正确接线,即:

①确认高压设备和调压设备正常;

②确认保护电阻的阻值正常,水位正常;

③确认保护球间隙的尺寸正确,实际放电电压 u 与试验电压 u_H 相配合, $u=1.15u_H$;

④测量试品电容,选定发电机的电感补偿;

⑤确认试品接地端子是与地网接地端子相连接,并连接可靠;

⑥高压测量设备与试品并联连接,并对电压指示进行检查或校正。

4 试验方法

高电压试验是耐受性试验,所以,在试验前,要做好准备工作,确认应具备的试验条件。在试验时,要按规定方法操作,避免发生意外,发生故障。具体来说,操作时,合闸电压和跳闸电压不得过高,避免产生过电压。所以规定合闸电压要低于试品耐受电压(或规定的最高试验电压)的 $1/3$ 。跳闸电压要低于耐受电压的 $1/3$ 。但是,在试品击穿或外绝缘闪络时,要立即跳闸断电,避免事故扩大。合闸后,逐步升高电压到耐受电压的 70%,升压速度取每秒 5%~10%。再后,升压速度按每秒

2%~3%升至耐受电压 100%。在升压过程中,要注意观测记录异常现象。在耐受电压下,持续规定时间(通常是 60s),并注意观测和记录异常现象。在耐受电压时间达到时,立即降低电压。降压速度可按设备最大降压速度计,但不得立即分闸,断电。因为分闸时会产生过电压。在电压降至 1/3 耐受电压时,可以分闸断电。在降压过程中亦要注意观测和记录异常现象。在升压和耐压过程中,若听到放电声,或观测到放电信号(如局部放电量达到 10 000pC),或电流表指示变化明显时,应立即降压。但不应立即分闸断电。在升压、耐压和降压过程中,若听到较大的放电声,同时电压指示变化明显,电流表指示变化明显,局部放电量突变(超过 10 000pC)时,应立即分闸断电,以避免故障扩大。异常分闸断电后,对问题要进行分析 and 报告,进而才能根据研究结果进行再试验。正常分闸断电后,还要对试品进行检测,对试验记录进行核对,确认无误后签字,表示试验工作结束。

试验工作结束之后,要编写试验报告或出具试验证明。试验报告要做到真实和完整,以保证试验有效。

第九章 感应耐压试验

第一节 概 述

感应耐压试验是考核变压器电气强度的一个重要试验项目。试验目的,对于全绝缘的变压器主要是试验变压器的纵绝缘(绕组匝间、层间、段间)和相间绝缘,对于分级绝缘的变压器是用来验证变压器每个线端和它们连接的绕组对地及对其他绕组的耐受强度以及相间和被试绕组纵绝缘的耐受强度。

1 试验方法

试验采用两倍额定电压的办法来考核绕组匝间、层间、段间和相间及对地绝缘。如果用工频来试验则是不可能的,因为铁心磁通极度饱和, I_0 急剧增长超过额定电流,因此需要很大的试验电源。为此需要有一个高于工频的试验电源。由电工原理可知:

$$E=4.44f \cdot W \cdot B \cdot S \quad (9-1)$$

式中 E ——感应电势, V;

f ——频率, Hz;

W ——绕组匝数;

B ——磁通密度, T;

S ——铁心截面, cm^2 。

从式(9-1)可知,若磁密不变,增加1倍电压,必须使频率增加1倍,即从50Hz增加到100Hz。

对于中小型变压器感应试验,一般采用100Hz。对于大型和特大型变压器的感应试验,一般采用150Hz或200Hz为好。因为有的变压器,如自耦变压器感应可施加2~3倍额定电压,若用100Hz,势必需要有很大的试验容量的电源,对设备投资是不经济的。采用150、200Hz,使变压器磁密大大降低, I_0 大大减小。但频率愈高,被试品的容抗愈小。一般来说,对220kV以上变压器的 I_c 大于 I_0 ,呈容性状态,需要用电感补偿。

2 试验时间

用 $t=60 \times \frac{100}{f}$,持续时间不少于15s。即100Hz是60s,150Hz是40s,200Hz是30s。

3 试验判断

在试验过程中,没有发现放电声,电压表指针不摆动,电流表指针不突然上升或下降,并通过空载试验,损耗及空载电流不变化,则认为变压器纵绝缘或主绝缘试验是合格的。如果匝间击穿,或过电压引起球隙放电,则很明显产品是有缺陷的。需要详细查找原因。

第二节 典型的感应试验接线图

1 全绝缘变压器的感应试验

试验接线图见图9-1。本试验与空载试验无大区别,只是施加2倍频率,2倍额定电压,观察三相电压及电流变化。但要注意的是,要防止高压相间过电压。例如121kV,允许相间电压200kV。因此要把分接置于最小分接,即 $121 \times 0.95 = 115\text{kV}$,为了相间不超200kV,则只能施加1.74倍额定电

压。

2 分级绝缘变压器感应试验

我国 110kV 及以上的电力变压器,中性点以直接接地的方式运行,因此对于变压器中点绝缘水平的要求降低了。降低了中点绝缘水平的变压器叫分级绝缘变压器。

对此类变压器不能用外施高压做主绝缘试验,要用感应试验的办法来考核其主绝缘和纵绝缘强度,见表 9-1。试验应满足下列几个要求:

(1)被试端的试验电压对地及相间均应符合标准要求。不同频率对应不同持续时间。

(2)感应试验电压倍数一般要达到 2 倍额定电压,而对自耦变压器允许高于 2 倍额定电压。

(3)被试绕组线端与该相相邻绕组最近点之间的电压最好达到试验电压,如果达不到时允许降低,但降低值不得超过 8%。

对于自耦变压器,若在试验中某一绕组对地电压超过 105%的试验电压,或相间电压超过 110%的试验电压,允许降低试验电压,但降低值不得超过 8%。

然而标准并无此规定,只规定不超过标准试验电压。根据以往实践,是可行的。

(4)被试线端对地与匝间、层间和相间的感应试验最好一次完成。若不然,可将对地试验、相间试验分别进行。

主绝缘试验电压见表 9-2。

2.1 单相变压器

2.1.1 直接激磁法(见图 9-2)

电压比较大的变压器常采用此法。

电源电压 $U_1 = \frac{U_y}{K_B K_2}$ (9-2)

式中 U_y ——试验电压,kV;

K_B ——被试变压器的电压比;

K_2 ——中间变压器的电压比。

在满足被试端对地试验电压时,其被试绕组对相邻绕组最近点的试验电路以图 9-2 中(c)最理想,图 9-2(a)较理想,图 9-2(b)一般不采用。

2.1.2 自耦连接法(见图 9-3)

适用于电压比较小的变压器。

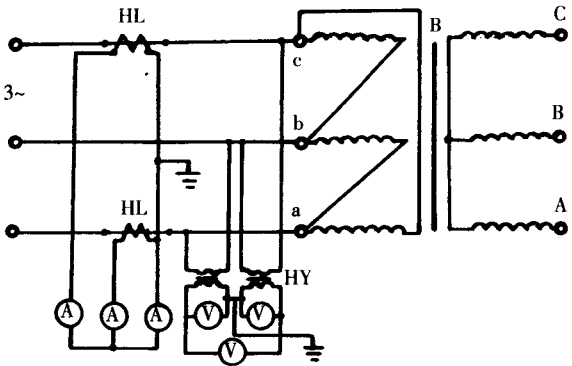


图 9-1 全绝缘变压器感应高压试验线路图

B—被试变压器 HL—电流互感器 HY—电压互感器

表 9-1 分级绝缘绕组中性点的绝缘水平

电压等级 /kV	设备最高电压 U_m (均方根值) /kV	中性点 接地方式	工频耐压 /kV	全波冲击 (峰值) /kV	中点绝缘 等级 /kV
110	126		95	250	35
220	252	死接地	85	185	35
		不死接地	200	400	110
330	363	死接地	85	180	35
		不死接地	230	550	110
500	550	死接地	85	180	35
		不死接地	140	325	60

表 9-2 主绝缘试验电压

电压等级/kV	应试电压/kV	对地电压/kV	相间电压/kV
110	200	200	200
220	400	400	400
330	510	510	570
500	680	680	

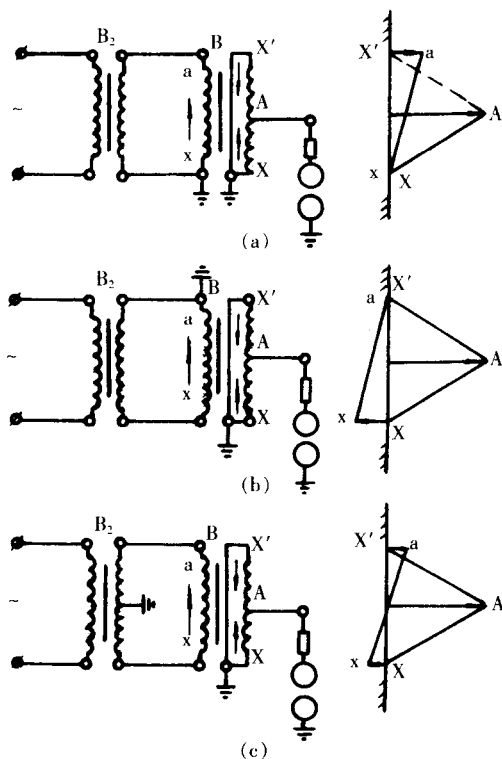


图 9-2 直接激磁法

(a) 低压绕组末端接地 (b) 低压绕组首端接地

(c) 中间变压器高压绕组的中部接地

B₂—中间变压器 B—被试变压器

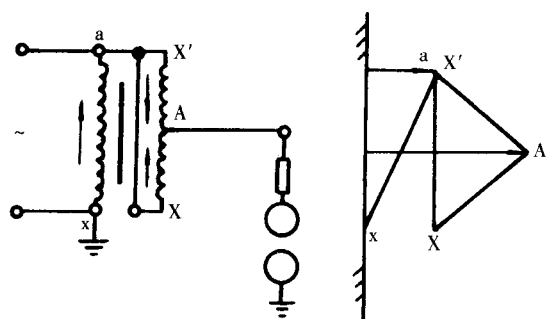


图 9-3 自耦连接法

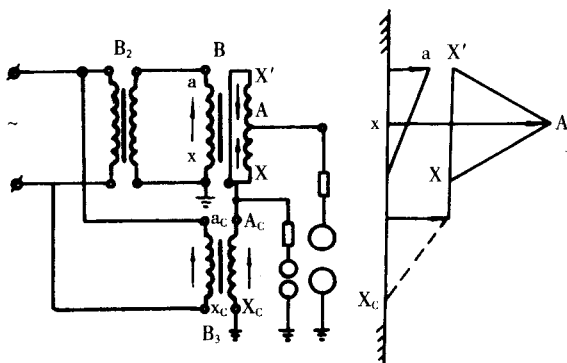


图 9-4 支撑法

B₃—支撑变压器 B₂—中间变压器 B—被试变压器

$$\text{电源电压 } U_1 = \frac{U_y}{1+K_B} \quad (9-3)$$

但 A 对 $\frac{1}{2}ax$ 间的试验电压 $U = U_y - \frac{1}{2}ax$ 低很多这是不足之处。

2.1.3 支撑法(见图 9-4)

用外加支撑用的辅助变压器把被试端试验电压提高。

对电源侧施加的电压为

$$U_1 = \frac{U_y}{K_B K_2 + K_3} \quad (9-4)$$

式中 K_3 ——支撑变压器电压比。

线端 A 对 $\frac{1}{2}ax$ 间的试验电压(kV)为:

$$U = U_y - \frac{1}{2}ax \quad (9-5)$$

2.2 三相变压器

三相变压器的主绝缘是不能用三相感应电压来试验的,只能分相进行。

2.2.1 1.5 相试验法(见图 9-5)

把非被试两相的首端并联接地,以支撑被试相提高其试验电压。被试相绕组匝间感应电压是 2

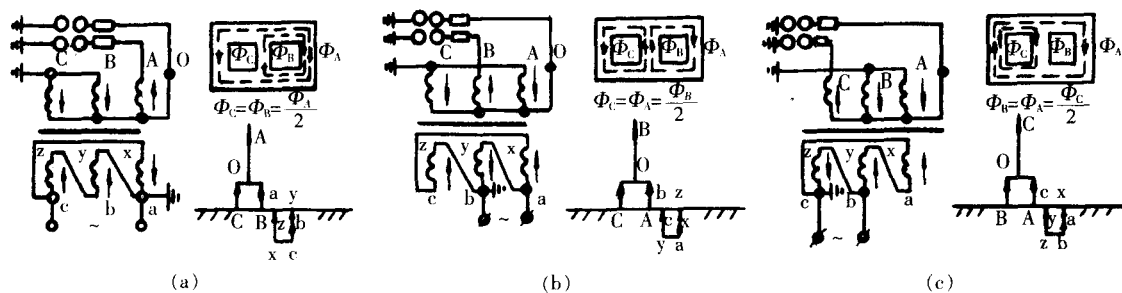


图 9-5 1.5 相试验的正常接法

(a) 试验 A 相 (b) 试验 B 相 (c) 试验 C 相

倍,而非被试相是 1 倍。对应的磁通,被试相铁心柱上是 Φ ,非被试相铁心柱上是 0.5Φ ,因而叫整个试验为 1.5 相试验法。

此时,被试端可达到要求的对地或相间的试验电压。其计算按式(9-6):

$$U_y = 1.5U_{2\phi} \quad (9-6)$$

式中 U_y ——试验电压, kV;

$U_{2\phi}$ ——两倍相电压, kV。

例如, $110 \pm 2 \times 2.5\% \text{ kV}$

假如三相分接都是 1 分接

则 $U_y = 1.5 \times (2 \times 110 \times 1.05 / \sqrt{3}) = 200 \text{ kV}$

假如三相分接都是 5 分接

则 $U_y = 1.5 \times (2 \times 121 \times 0.95 / \sqrt{3}) = 199 \text{ kV}$

同理 $220 \pm 2 \times 2.5\%$, 三相 1 分接 $U_y = 400 \text{ kV}$

三相 5 分接 $U_y = 398 \text{ kV}$

而中点则不能达到其规定的试验电压,因此应先进行外施高压试验。另外要注意的是,中点与低压绕组最近点之间的电压不能超过中点耐压水平。否则,要改变低压绕组的接地点,为安全起见,最好是末端接地。

这种试验法对 110kV、220kV 电力变压器的试验应用很广泛。

2.2.2 中点支撑法

当用 1.5 相试验法不能达到要求时,可以用中点支撑法,选择适当的支撑变压器来调节所需的支撑电压。今以 B 相试验为例,见图 9-6。

$$U_y = U_0 + U_{2\phi} \quad (9-7)$$

式中 U_0 ——支撑电压, kV。

支撑电压不能超出中点耐压水平。如果接近或达到试验电压时,则要经受三次耐压试验,这是一个缺点。

2.2.3 自身励磁法(见图 9-7)

适用于 330kV、500kV 级三相五心柱变压器的感应试验。今以 A 相为例。

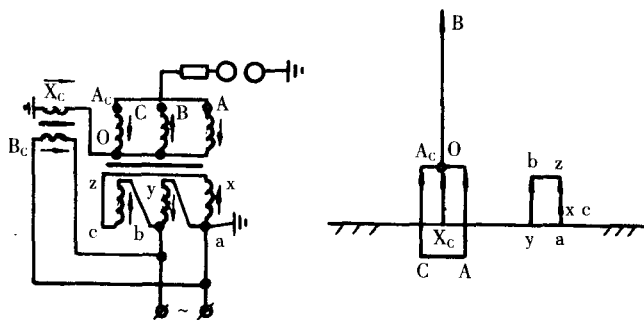


图 9-6 中点支撑法试验图

2.3 单相自耦变压器

2.3.1 直接励磁法(见图 9-8)

高压对地试验电压都能满足,是很简便的试验方法。

2.3.2 支撑法(见图 9-9)

从图 9-9(a)看,支撑电压与被试感应电压的极性相反,降低了试验电压,而是使纵向电压提高,一般不宜采用。

从图 9-9(b)看,支撑电压与被试感应电压的极性相同,各部分电压都满足要求。这对于升压或降压单相自耦变压器都是适用的,是正规的接法。

2.4 三相自耦变压器

对三心柱 YN,a0,d11 的三相自耦变压器,在试验 B 相时,可利用 A、C 两相的中压绕组进行支撑(见图 9-10(a))。

为了尽量满足对地试验电压要求,应考虑相间电压不应超过 110% 的试验电压, B_m 对地不超过本身 105% 试验电压的前提下,有时要适当降低 B 端的试验电压,但降低值不应超过 8%。试验 A、C 相时,可以利用自身励磁法,同时进行 A、C 两相的感应高压试验(图 9-10(b))。自耦变压器允许 2~3 倍额定电压励磁,此时利用自身的感应就能达到对试验电压的要求,因此 A、C 两线端对地及相间的试验电压都一样。

对于五柱三相自耦变压器,采用自身励磁法,则绕组对地及相间的试验电压都相同,是较为理想的简便方法。见图 9-11。

2.5 非被试相励磁法(见图 9-12)

在 1.5 相试验法中,当中间变压器输出电压不能达到 $2U_N$ 要求时,可以在非被试相施加 $1U_N$ 来试验,同样达到试验目的。

由于非被试高压两相并联,因此强迫该两相磁通 Φ 相等,而且方向相同,合成流向试验相等于 2Φ ,故试验相感应 $2U_N$ 。

不过,试验电源的容量并不变化,因为电压降低一半,而电流就增大一倍。这种试验是不正规的。只有在条件不具备或检修现

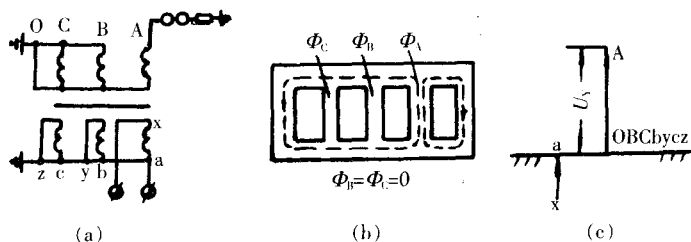


图 9-7 五柱三相变压器自身励磁法

(a) 试验接线图 (b) 磁通回路 (c) 向量图

U_1 —高压绕组试验电压

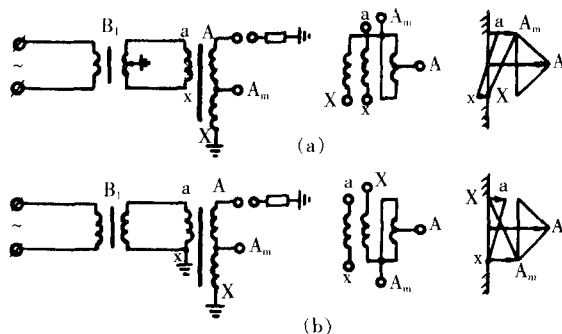


图 9-8 单相自耦变压器直接励磁法

(a) 升压变压器 (b) 降压变压器

左为试验接线图 中为绕组结构图 右为电压分布图

B_1 —中间变压器 B—被试变压器

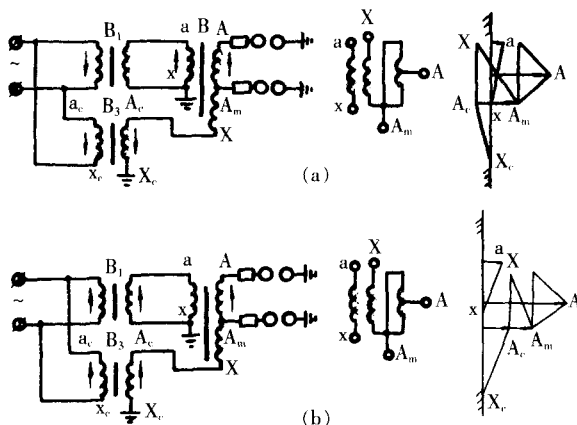


图 9-9 单相三绕组自耦变压器支撑法

(a) 支撑变压器与被试变压器的反向串联

(b) 支撑变压器与被试变压器的正向串联

左为试验接线图 中为绕组结构图 右为电压分布图

B_1 —中间变压器 B_3 —支撑变压器 B—被试变压器

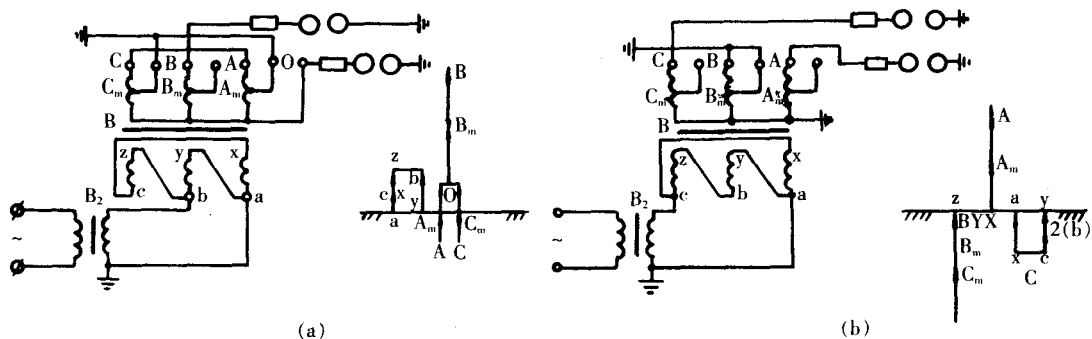


图 9-10 三相 YN,a0,d11 变压器试验接法

(a) 试验高压 B 相 (b) 试验高压 A、C 相

场才运用。

3 试验电压测量设备及方法

对于感应试验电压的测量，尤其是 35kV 级及以上大型变压器的感应试验，由于容升的影响，实际感应试验电压将高于按变压比计算的电压，所以最好采用直接法测量感应试验电压。测量设备及方法同第八章第三节之 5.1、

5.2。此外也可采用球极法。如果采用低压侧电压表法，应预先在 80% 电压以下采用直接测量设备（第八章第三节之 5.1、5.2 设备或标准球极）进行校准，然后再外推至 100% 试验电压。

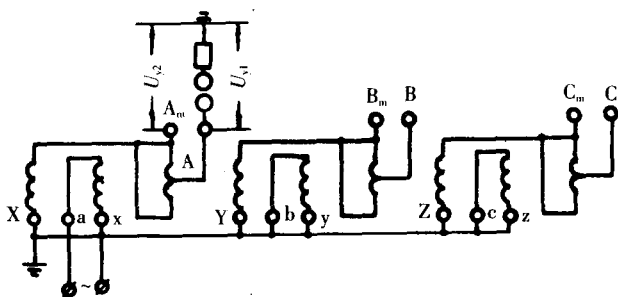


图 9-11 五柱三相自耦变压器试验接线

U_1 —高压绕组试验电压 U_2 —中压绕组试验电压

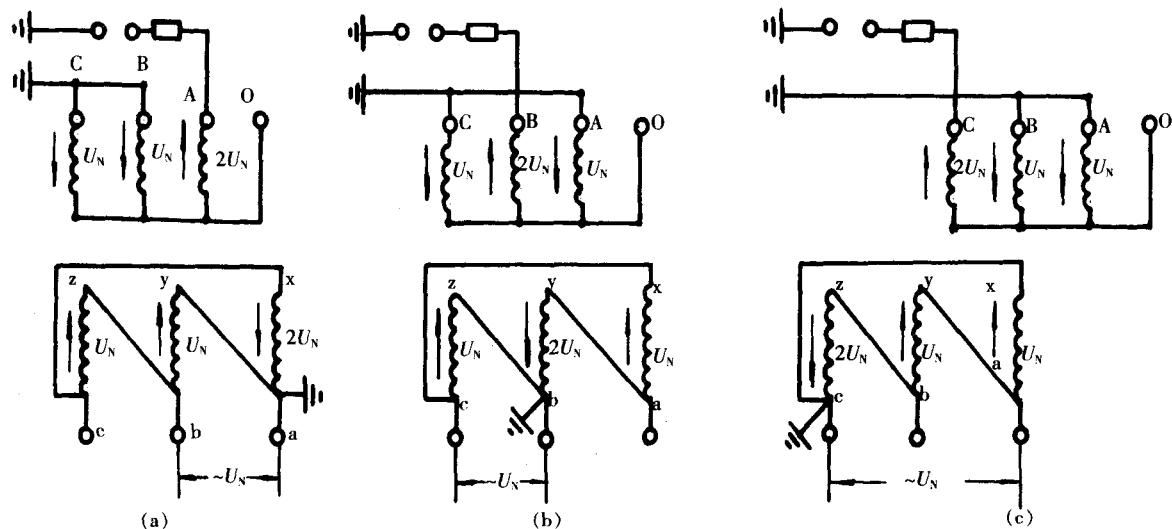


图 9-12 非被试相励磁法试验接线图

(a) 试验 A 相 (b) 试验 B 相 (c) 试验 C 相

4 感应试验故障判断及分析

故障判断及分析是非常重要的,要有可靠的仪器,也要有丰富的实践经验。对特大型产品的分析最好采用先进的电子仪器,才能做到科学的判断。一般情况下可根据下述办法判断:

(1)观察电压及电流表读数的变化。如果 U 突降, I 突升,可能是绕组有短路、击穿或电源线放电。如果 U 和 I 都摆动,可能有断续放电。

(2)听声音。如果突然有一声“当”,此时 U 及 I 无变化,可能是气泡放电。如果有炒豆声,可能有尖端放电,如进套管的引线锥部不正引起放电,分接开关爬电,铁心有悬浮电位放电。

(3)对比空载及负载试验前后数据。如果空载损耗增大 10% 以上,可能有匝间局部短路。

(4)吊罩检查。有的产品匝间虽然打穿,但再次试验仍能通过,当吊罩检查后就一目了然,放电痕迹很清楚。

产品放电的原因很多,情况很复杂,要根据情况具体分析,随着生产实践的发展,不断总结经验,就能迅速准确判断。

第三节 试验电源

感应高压试验电源的频率一般为 100Hz~250Hz。采用太高频率的发电机是不适当的,因为增加频率将大大增加铁心的单位损耗。除用中频发电机外,还有三倍频发生器和异步电机反拖。

1 中频发电机

中频发电机是制造厂试验站的正规试验电源。

(1)发电机的频率

$$f = \frac{pn_N}{60}, \text{Hz} \quad (9-8)$$

式中 p ——极对数;

n_N ——转数,转/分。

由此可知,改变极对数或转速,就可得到要求的频率,见表 9-3。

因此,从结构考虑,电机频率不宜超过 250Hz。频率愈高,极数就多,或提高转速,是很不经济的。

表 9-3 发电机频率

极数	n_N	f
12	1 500	150
16	1 500	200
32	750	200

(2)原动机可采用异步电动机或同步电动机。一般中小型的中频电机都采用异步电动机作原动机,因为三相异步电动机具有结构简单,坚固耐用,价格便宜,使用维护方便,同时又有较高的效率和相当好的工作特性等优点。另外,若输出同一功率的电机,其转速越高,所需的额定转矩越小,电机的机体也就小。因此可以较高的速度,以减小发电机的极数,结构就简单些。异步电动机的起动电流很大,因此有的允许直接全压起动,有的只能降压起动,例如星角起动,或用自耦变压器起动。

大型中频发电机用同步电动机作原动机。同步电动机的功率因数较高,因而能以 $\cos\varphi=1$ 运行,不需要从电网吸取无功功率。对大功率低转速的电动机,它的体积比异步机要小些。因此做成低转速,而增加发电机的极数是容易做到的。此外,同步电动机的气隙也较大,因而运行效率较高与过载能力较大。所以用来拖动大型中频发电机是合适的。同步电动机采取异步起动。一般采用:定子绕组从星形换接成三角形的起动,借助于感应线圈(电抗器)或自耦变压器起动以及两段起动。此后当它的速度达到同步速度的 95% 时,在激磁电路中接通直流,于是电动机进入同步。

(3)同步发电机的励磁

①小型发电机以桥式整流电路(见图 9-13)作为励磁用的直流电源,其调节是由三相自耦调压

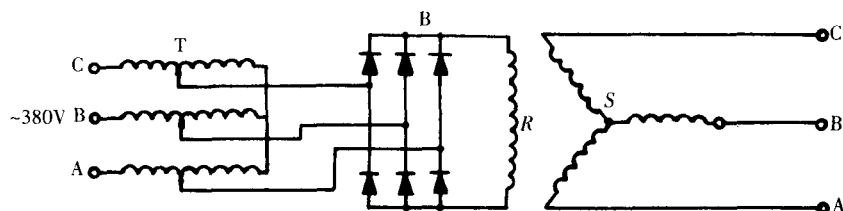


图 9-13 桥式整流激磁线路图

S—发电机的定子绕组 R—发电机的激磁绕组 B—桥式整流装置 T—三相自耦调压器

器供给。

②中型发电机的激磁(见图 9-14)

一般以并激发电机作为同步电机激磁用的直流电源。它和同步电机连在同一轴上。这种发电机称为激磁机。

N 是借助于调节激磁机的激磁电流,因而,也就是借助于改变激磁机端电压来改变同步机的激磁电流。经过 M 是同步电机的全部激磁电流。因此调整 M 能够直接改变激磁电流的大小,就能使发电机电压升高或降低。

③大型发电机的激磁(见图 9-15)

为了使发电机端电压调节范围大,使用更加稳定,激磁电路采用主激磁机和副激磁机。

根据试验时所需的端电压,预先调节 B_2 的电枢电压到一定值,以后保持不变,然后调节 B_1 的端电压,供给发电机激磁绕组电流来调节发电机的输出电压。

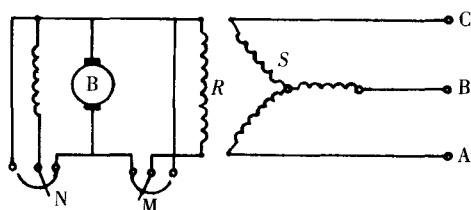


图 9-14 中型同步发电机激磁线路图

S—发电机的定子绕组 R—发电机的激磁绕组
B—激磁机的电枢 M—磁场调整器 N—分路调整器

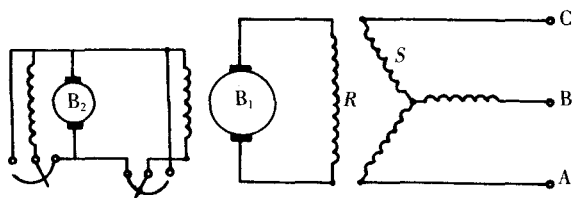


图 9-15 大型同步发电机激磁线路图

B_1 —主激磁机 B_2 —副激磁机

(4)发电机的容量(经验公式)

100Hz 发电机的容量按式(9-9)选择(三相试验):

$$P_g = 2 \times 1.3 \times I_0 \times S = 2.6 I_0 S \quad (9-9)$$

式中 P_g ——三相发电机容量, kVA;

I_0 ——最大被试变压器的空载电流百分数, %;

S——最大被试变压器三相容量, kVA;

2——试验容量与空载容量之比;

1.3——空载电流的裕度。

150Hz 发电机的容量按式(9-10)选择(三相试验):

$$P_g = 2 \times (0.4 \times 1.3 \times I_0 \times S) = 1.04 I_0 S \quad (9-10)$$

式中 0.4——150Hz、 $2U_N$ 下的试验电流与 50Hz、 U_N 下的空载电流的比值。

200Hz 发电机的容量按式(9-11)选择(单相试验):

$$P_g = 1.8 \times 1.3 \times I_0 \times S_1 \times \sqrt{3} = 4.05 I_0 S_1 \quad (9-11)$$

式中 1.8——单相 200Hz、 $2U_N$ 下试验容量与单相 50Hz、 U_N 下空载容量之比;

S_1 ——最大被试变压器单相容量, kVA;

$\sqrt{3}$ ——单相换算到三相发电机时的系数。

以上所列式子, 还应乘上电压变换因数 1.1 及安全因数 1.1。

2 异步电机反拖(见图 9-16)

使用一台异步电动机同轴反拖一台具有滑环的三相绕线式异步电机。由绕线式电机转子滑环输出 100Hz 三相电源。

基本原理是:

当 g 定子输入频率 $f_1=50\text{Hz}$ 的对称三相电源时, 将在定子与转子间的气隙产生一旋转磁场, 其转速为 n_1 。

$$n_1=60f_1/P, \text{r/min}$$

式中 P ——绕组磁极对数。

设转子的转速为 n , 转子上感应的频率 f_2 为:

$$f_2=f_1S \quad (S=\frac{n_1-n}{n_1})$$

式中 S ——转差率。

当转子静止时(即 $n=0$), 转子上感应电势的频率符合变压器电磁感应原理, 即:

$$f_2=f_1=50\text{Hz} \quad (S=1)$$

当 n 与 n_1 同向且转速相等时(即 $n=n_1$), 转子上感应电势的频率为:

$$f_2=f_1S=0 \quad (S=0) \quad (\text{此时转子与旋转磁场相对静止})$$

当 n 与 n_1 反向, 且转速相等时(即 $n_1=-n$) 转子上感应电势的频率为:

$$f_2=f_1S=2f_1=100\text{Hz} \quad (S=2)$$

当然, 由于拖动电动机系异步电动机, 必然存在一定转差, 即不可能完全达到同步转速。故实际运行中略低于 100Hz。

该发电机的功率可按下式计算:

$$P=UI\sqrt{3}=P_1+P_2 \quad (9-12)$$

式中 P ——发电机功率, kW;

U ——发电机输出电压, V;

I ——发电机输出电流, A;

P_1 ——变频部分电动机功率, kW;

P_2 ——驱动电动机功率, kW。

驱动电动机功率

$$P_2=P_1(\frac{f_2}{f_1}-1) \quad (9-13)$$

这个机组一般用于小型变压器的试验, 不是常规的试验设备。

3 两台异步电机对拖(见图 9-17)

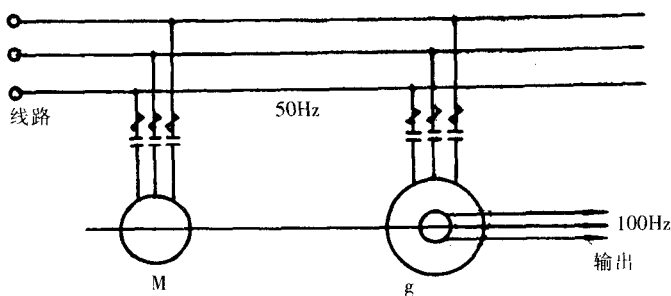


图 9-16 绕线式异步电机的反拖线路

M—异步电动机 g—绕线式异步电机

异步电动机为原动机,其定子接至线路,绕线式异步电动机作为发电机,其转子经调压器或感应调压器接至线路,而其定子接至被试变压器。

改变发电机转子的电压可以改变施加在被试变压器上的电压。发电机励磁电流所产生的旋转磁场以电动机的转数旋转。同时发电机的轴由电动机拖动以发电机的转数旋转,因此在定子上感应出两倍频率的电压。

4 三倍频发生器(见图 9-18、图 9-19)

由三台单相变压器组成,一次侧接成星形,二次侧接成开口三角形。为了补偿负载时一次线圈的电压降,在线路上接有电容器。三倍频发生器是利用磁通的三次谐波为基础的。

当从一次侧加入 50Hz 三相正弦电压时,各相磁通的基波彼此相差 120° ,因此,在二次绕组相串联时,由于其中所感应的电势基波也是互差 120° ,故这些基波之和等于零,于是在开口三角形得出的电势不会含有基波。但由于这些磁通的三次谐波是彼此同相的,因而它们在三个变压器的二次侧就将感应出大小相等、相位相同的三倍频电势来。因此三倍频发生器的输出端电压,在没有负载时,就将等于每一变压器二次绕组感应电势的三倍。

它的表达式为:

$$U_{MN}=3 \times 4.44(3f)\omega_2 \Phi_{3m}=40f\omega_2 \Phi_{3m} \quad (9-14)$$

由于三倍频发生器需要有合适的变压器和试验电源,同时占用的场地也较多。因此在制造厂试验站很少使用它。

另外,采用五柱铁心可代替三台单相变压器,此时,三次谐波磁通可经旁轭形成通路,也能得到同样结果。运用起来更为方便。

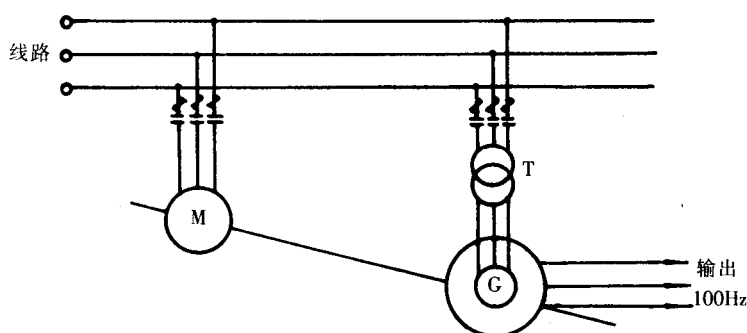


图 9-17 两台异步电动机对拖线路

G—发电机 M—电动机 T—调压器

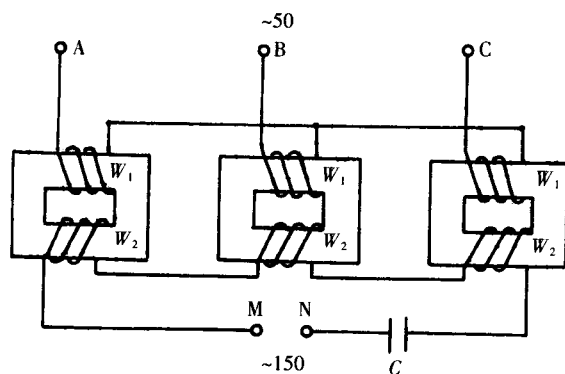


图 9-18 三相电力网供电的三倍频发生器电路图

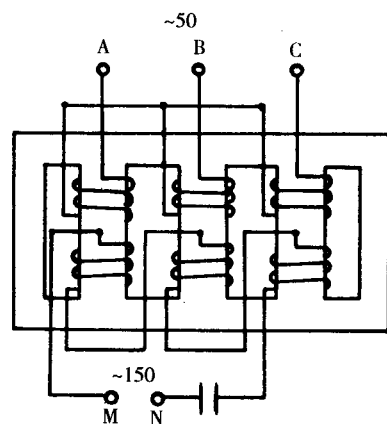


图 9-19 五心柱三倍频发生器电路图

第四节 感应试验容量的估算

分级绝缘变压器做感应高压试验时,所需的试验容量,对现有的发电机是否能满足要求,应该做到心中有数,特别是高电压大容量产品,能否保证安全可靠地试验是至关重要的。若在现场检修

产品,要求按 85%感应高压试验,也需要知道试验容量,以便适当地准备试验设备。

试验容量估算的方法多种多样。首先要计算在中频下的试验电流是多少。因为被试变压器感应试验是由激磁阻抗和绕组纵向电容及对地电容组成的并联阻抗。在某个试验频率下,被试变压器的电流是呈感性的或容性的。现以 50Hz 空载试验数据来折算到试验周波的电流数值,因为激磁阻抗是随频率的变化而变化的。而电容电流是用测量电容量来估算。可以在测量 $\tan\delta\%$ 时计算出绕组对地电容,乘以系数来估算绕组纵向电容及对地电容。当然,计算结果不一定很精确。一般来说,通过试验来验证估算,是可信的。

【例】360MVA/330kV 被试品感应电流的估算

(1)产品规格

$S_H:360\ 000\text{kVA}$

$U_H:363/18\text{kV}$

$I_H:573/11\ 547\text{A}$

组别:YNd11

铁心:五心柱

(2)感应高压试验要求

频率:200Hz,30s

倍数:2.44

高压端(A、B、C)-地:510kV

相间:570kV

(3)50Hz 铁心空载试验数据

①三相激磁时见表 9-4。

②B 相激磁,A、C 两相短路见表 9-5。

(4)以 B 相为例,用自身激磁法,A、C 两相短路,B 端对地 510kV,感应倍数 2.44,频率 f 为 200Hz,30s。

①在 f_H 为 50Hz,额定电压(B_H 为磁密 16.4kGs)时

$$\text{有功电流 } I_{W\ 50} = \frac{86\ 130}{6\ 480} = 13.3(\text{A})$$

$$\text{无功电流 } I_{M\ 50} = \sqrt{63^2 - 13.3^2} = 61.6(\text{A})$$

②感应试验时的磁密

$$B_f = \frac{50}{200} \times \frac{2.44}{1} \times 16.4 = 10\text{kGs}$$

③求 $I_{M\ f}$

$$I_{M\ f} = \frac{H_f}{H_{50}} \times I_{M\ 50} \tag{9-15}$$

式中 $I_{M\ f}$ ——频率为 f 时的无功电流,A;

H_f ——频率为 f 的磁场强度,安匝/cm;

H_{50} ——50Hz 的磁场强度,安匝/cm。

因为 $H_f = \frac{nI'}{l}$,当匝数 n 及铁心磁路 l 为一定时, $H_f \propto I'$,所以可用 I'_f 来代替式(9-15)中的 H_f 。

I'_f 可从三相空载 60% U_N 时的数据求出:

表 9-4 三相激磁空载试验数据

$U_N(\%)$	$U(\text{V})$	$P_0(\text{W})$	$I_0(\text{A})$
60	3 900	42 500	8.6
90	5 830	111 000	39.6
100	6 480	146 500	70.8

表 9-5 单相激磁空载试验数据

$U_N(\%)$	$U(\text{V})$	$P_0(\text{W})$	$I_0(\text{A})$
60	3 900	27 460	9.2
90	5 830	65 470	38
100	6 480	86 130	63

$$I_0' = \frac{8.6}{\sqrt{3}} = 4.97(\text{A}) \quad (\text{相电流})$$

$$I_a' = \frac{P'}{30'} = \frac{42\,500}{3 \times 3\,900} = 3.7(\text{A})$$

$$I_r' = \sqrt{4.97^2 - 3.7^2} = 3.4(\text{A})$$

同理 I_r 可从三相空载 $100\%U_N$ 时的数据求出:

$$I_0 = \frac{70.8}{\sqrt{3}} = 40.9(\text{A})$$

$$I_a = \frac{P}{3U} = \frac{146\,500}{3 \times 6\,480} = 7.5(\text{A})$$

$$I_r = \sqrt{40.9^2 - 7.5^2} = 40(\text{A})$$

$$\text{故 } I_M = \frac{3.4}{40} \times 61.6 = 5.2(\text{A})$$

④求 I_{Wf}

$$I_{Wf} = \left(\frac{f}{f_H}\right)^{1.3} \left(\frac{B_f}{B_H}\right)^n \cdot I_{W50} \quad (9-16)$$

式中 n 约等于 2, 或按下式计算:

$$n = 18.5 \lg \frac{p_{17}}{p_{15}} \quad (9-17)$$

式中 I_{Wf} ——频率为 f 时的有功电流, A;

p_{17}, p_{15} ——在 50Hz 时磁密为 15 000Gs 及 17 000Gs 的比耗值, W/kg。

因为同一台产品, 重量是相同的, 则可用 15 000Gs 及 17 000Gs 时的空载损耗来代替 p_{17}, p_{15} 。

而 p_{15} 相当 $91.5\%U_N$ 时的损耗, 可取 $90\%U_N$ 时的数值, p_{17} 可取 $100\%U_N$ 时(即 16 400Gs)的损耗(表 9-4)。

将数值代入式(9-17), 得:

$$n = 18.5 \lg \frac{146\,500}{111\,000} = 18.5 \times 0.12 = 2.23$$

将有关数据代入式(9-16)

$$I_{Wf} = \left(\frac{200}{50}\right)^{1.3} \left(\frac{10}{16.4}\right)^{2.23} \times 13.3 = 6 \times 0.33 \times 13.3 = 26.3(\text{A})$$

I_{Mf}, I_{Wf} 是用做铁心空载试验数据计算的, 因为铁心临时绕的匝数与成品匝数不相同, 故应折算才符合实际。

$$I_{Mf} = 5.2 \times \frac{6\,480}{18\,000} = 1.9(\text{A})$$

$$I_{Wf} = 26.3 \times \frac{6\,480}{18\,000} = 9.5(\text{A})$$

⑤电容电流的计算:

绕组的电容是由匝间电容、段间电容和对地电容所组成, 计算很麻烦。现用对地电容乘以一定系数来代替。这个系数与绕组结构及布置有关。本产品的高压端是电缆引线出头, 因此电容较大。现取整体电容的 $1/3$ 作每相对地电容, 因感应时, 一端接地, 所以取其 0.6。同时试验电压也只按 $1/2$ 来算。

测出电容: 高压-地 32 500 μF , 低压-地 36 800 μF 。

感应时高压电容电流为

$$I_{C2}=2\pi fCU=2\times 3.14\times 200\times \frac{0.0325}{3}\times 10^{-6}\times 0.6\times 510\times 10^3\times \frac{1}{2}=2.08(\text{A}) \quad (9-18)$$

折至低压侧:

$$I_{C2}'=2.08\times \frac{363/\sqrt{3}}{18}=24.2(\text{A})$$

感应时低压的电容电流

$$I_{C1}=2\times 3.14\times 200\times \frac{0.0368}{3}\times 10^{-6}\times 0.6\times 44\times 10^3\times \frac{1}{2}=0.2(\text{A})$$

总电流 $I_C=I_{C2}'+I_{C1}=24.2+0.2=24.4(\text{A})$

低压侧总的试验电流

$$I=\sqrt{(I_C-I_M)^2+I_{w,r}^2}=\sqrt{(24.4-1.9)^2+9.5^2}=24.4(\text{A})$$

可见回路电流是呈容性的。

⑥试验容量:

$$S=UI=44\times 24.4=1\,074(\text{kVA})$$

⑦选择发电机容量:

三相发电机改为单相运行时,其容量为:

$$S_1=0.58S_3$$

考虑中间变压器变比不合适的系数 1.1 时,发电机的容量约为:

$$S_3=1\,074\times 1.1/0.58=2\,037(\text{kVA})$$

为了避免自励磁问题,应该考虑选择 1.5~2 倍的容量,才能确保安全试验。因此采用 7 500kVA200Hz 发电机做试验电源。

⑧实际试验 510kV 时,测得电流如下:

在低压侧:A 相 24A,B 相 24.5A,C 相 24.5A。

⑨相间 570kV 的电流计算方法同上,此不赘述。

第五节 试验频率的选择

被试变压器感应试验时,实质上是电容器及带有铁心的电感线圈的并联。是一个典型的电流铁磁共振电路(见图 9-20)。

被试绕组的电感与分布电容构成电感电容的链形电路,其电容电流与试验电压及试验频率成正比,电感电流则与试验电压成正比,与试验频率成反比。

电感电流滞后于电压 90° , 因而作出电流与电压间的关系曲线见图 9-21, 对电感来说,其曲线 I_L 与磁化曲线相似。对电容来说,其曲线则为一倾斜的直线 OI_C 。两曲线横坐标的差 $I_C-I_L=I$ 便确定当外电压 U 具有各个不同数值时,在电路末分岔部分的电流曲线。 $U=f(I)$ 由 $OA_1A_2A_3$ 曲线表

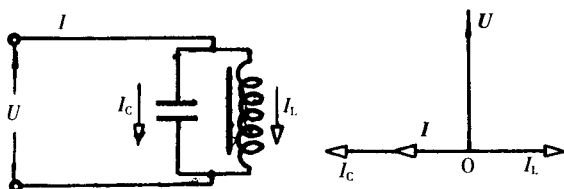


图 9-20 可能发生电流铁磁共振电路图

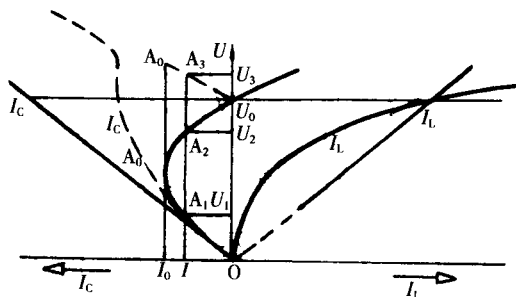


图 9-21 电流与电压的关系曲线

U 具有各个不同数值时,在电路末分岔部分的电流曲线。 $U=f(I)$ 由 $OA_1A_2A_3$ 曲线表示。

假定做感应试验时施加 100Hz 正弦电压,得到外部电路中的电流与外电压之间的关系曲线 $OA_1A_2A_3$ 。这一曲线表明:若外电压小于 U_0 时,总电流超前于外电压,而当电压大于 U_0 时,则总电流滞后于外电压。当电流为 I 时,可能的电压数值有三个: U_1 、 U_2 、 U_3 。这是不稳定的。若电流大于 I_0 ,只能有一个外电压数值。如果施加电压在磁化曲线的弯曲部分以上,就有可能发生电流铁磁共振,此时 I_C 、 I_L 大小相等相位相反,电路电流几乎为零。故在谐振时电流在并联回路中自行闭合,电容就通过电感以与外施电压频率相同的固有振荡频率充电和放电。这种状态,对产品绝缘不利,不能确保安全试验。

为了在试验时稳步地升压和降压,应选 $U=f(I)$ 关系曲线的直线部分,这样就不存在电压突升和骤降。因此只有提高试验频率,使电感电流减少,亦即磁化曲线没有饱和弯曲,近似直斜线;使电容电流增大,这样就使 $U=f(I)$ 曲线向左移,直线部分增长。见图 9-21 中虚线所示。总电流呈容性,随电压增加而增加,试验安全可靠。所以选择电源的频率是至关重要的。

对中小型 35kV 以下的变压器全绝缘的感应试验用 100Hz 是合适的,因为它们的电容量小,同时激磁电流也不大,不存在电流铁磁共振现象。对于 110kV 级变压器,绕组一般是纠结连续式绕制,电容量稍大,因此采用 150Hz 进行分级绝缘感应高压试验是可靠的。而对 220kV、330kV、500kV 级产品,由于绕组结构复杂,有全纠的,有插入电容的,有多层圆筒式的。绕组布置有高-低-高,或高-低-低-高、低-高-低-高,电容量相当大。同时施加电压 2~3 倍。因此试验频率用 200Hz 才达到要求。当然,频率越高,发电机的结构就复杂,价格就越高。因频率高,电容电流就大,电机呈容性负载,因而自励磁现象就严重。

第六节 同步发电机的自激磁

分级绝缘变压器的感应高压试验,大都呈容性,因此发电机可能产生自激磁现象,对于 220kV 级及以上的产品试验,这种现象特别严重。这种现象虽然升压速度很快,但电压是逐渐上升的,当发现自激磁现象后,应立刻断开合闸开关,然后采取适当措施。

首先要了解同步发电机的自激磁原理,然后才能采取相应对策。

在容性负载时,电枢反应是磁化的。在没有激磁时,剩磁电势是产生电压的最初原因。因为这个电势而出现的负载电流,使发电机磁化,增大它的电势,反过来再使容性电流增大等等。因此,发电机以容性的负载电流激磁称为同步发电机的自激磁(见图 9-22)。

(1)在容性负载,没有激磁情况下,电流超前于电压 90° 。

电枢电流 I 与发电机端电压 U 之间有如下关系:

$$U=jIx=jI(X_{ad}+X_s)=jIX_d \quad (9-19)$$

式中 x ——是受电器的容抗, Ω ;

X_{ad} ——纵轴电枢反应的定子绕组电抗, Ω ;

X_d ——纵轴的定子绕组的同步电抗, Ω ;

X_s ——定子绕组的漏抗, Ω 。

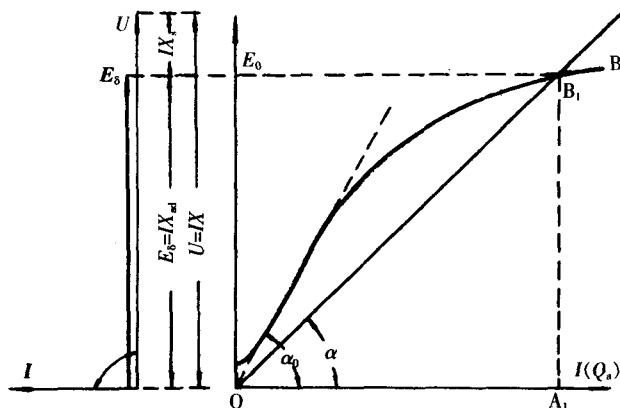


图 9-22 纯电容负载时发电机的电压间向量图
和无载特性曲线

(2)在给定的负载电抗 x 下,发电机的端电压 $U=Ix$

(3)电枢电势:

$$E_s = U - Ix_s = I(x - x_s) \quad (9-20)$$

(4)电流 I 在怎样的数值下,发电机才能稳定运行? 以下作以说明。

① E_s 和 I 为线性关系可以直线 OB 表示。

② E_s 和 I 彼此之间由无载特性曲线联系看,只有 B_1 点才能满足两个关系。

因此同步机在自激时,电压上升的过程终结于 $I=OA_1$ 时的 B_1 点。发电机端电压 $U=Ix$ 。

③ x 增大时,角 $\alpha = \arctg(x - x_s)$ 也同时增大。

当 $\alpha = \alpha_0$ 时,直线 $I(x - x_s)$ 与无载特性曲线起始的直线部分重合,发电机端电压实际上不可能稳定。

角度 α_0 决定电抗 x 的最大值,如果电抗继续增大,发电机便不可能自激磁。

(5)为了避免自激磁,直线 $I(x - x_s)$ 必须高于无载特性曲线的直线部分,亦即必须使

$$I(x - x_s) > Ix_{ad} \quad x > x_{d1} \quad (9-21)$$

这时 $x_{d1} = x_{ad} + x_s$ 应对于无载特性曲线的直线部分来取。

(6)如果 x 由负载的充电容量 P_x 来表示,那么不等式(9-21)变成如下形式

$$x_d < \frac{3U_N^2}{P_x} \quad (9-22)$$

当激磁等于零时,发电机端电压等于额定电压时的容性电流,称为发电机的充电电流。

$$I_3 = \frac{U_N}{x_d} \quad (9-23)$$

发电机的充电容量为

$$P_3 = mU_N I_3 = \frac{mU_N^2}{x_d} \quad (9-24)$$

式中 m ——相数。

(7)为了避免自激磁,发电机的充电容量必须大于容性负载的充电容量。

$$P_3 > P_x \quad (9-25)$$

【例】以一台 360 000/330 变压器为试品,采用 7 500kVA,6.6kV200Hz 同步发电机的做电源。

发电机是三相串联单相运行方式,其容量为 5 000kVA,单相运行参数: X_{ad1} 是 0.502, X_s 是 0.206

基础阻抗

$$Z_N = \frac{U_N}{I_N} = \frac{6\,600/\sqrt{3}}{656} = 5.8(\Omega)$$

纵轴同步电抗

$$x_d = (X_{ad1} + X_s)Z_N = (0.502 + 0.206) \times 5.8 = 4.1(\Omega)$$

若输出电压限制在 6.6kV,则其充电电流为

$$I_3 = \frac{6\,600}{3 \times 4.1} = 537(A)$$

充电容量为: $P_3 = 6.6 \times 537 = 3\,544(kVA)$

而试品 360 000/330 单相自激法,2.44 倍感应,试端电压 510kV 时,则容性负载的充电容量是发电机充电量的 0.3 倍。

试验开关一合闸,发电机未给激磁时,电压自动上升一般允许在 25%额定试验电压值以下。当

试完降压在 $25\%U_N$ 以下才能切断开关。从上可知充电容量为 0.3, 超过要求, 需要用电抗器并联补偿, 减轻发电机自激磁程度。

第七节 防止电压谐振发生的方法

前面已提到, 变压器感应试验是由电感和电容并联的等值电路, 如图 9-23 所示。如果在铁心磁通不饱和的前提下, 对于 35kV 以下的变压器用 100Hz 试, 由于 $2U_N$ 下, 相当 50Hz 的 U_N 下的磁密, 当 $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ 时, 电流呈容性。而发电机, 中间变压器、支撑变压器等均为电感负载。因此整个回路是一个电感和电容串联的电路。在特殊的情况下, 如果总的容抗接近或等于总的感抗时, 就要发生电压谐振现象。在铁心磁通不饱和情况下, 可以认为是一般电感电容串联谐振, 见图 9-24 所示。

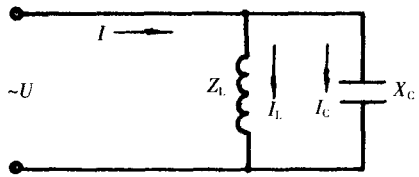


图 9-23 被试品的等值电路图

外加电压: $U = U_L - U_C$

电流: $I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}}$

当输出开关一合闸, 由于发电机有自励磁, 电压缓慢自动上升, 然后突然猛升, 致使保护球隙放电。虽然电源电压很低, 但试品线端的电压是相当高了。而且电流也较大。这就断定是电压谐振发生。需要采取措施, 否则无法继续试验。

在铁心磁通饱和的情况下, 可观察到非常独特的现象。

在图 9-25 中 $U_L = f(I)$ 由曲线 OB_1BB_0

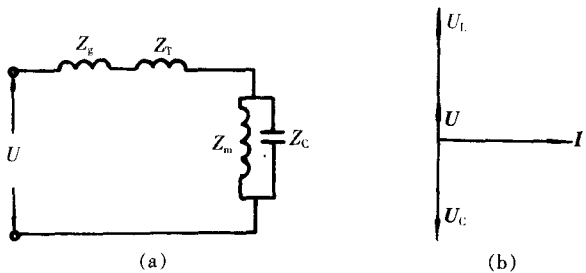
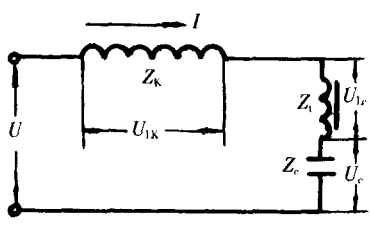
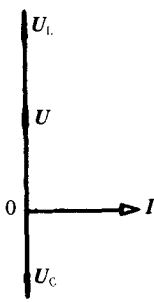


图 9-24 电感和电容串联电路

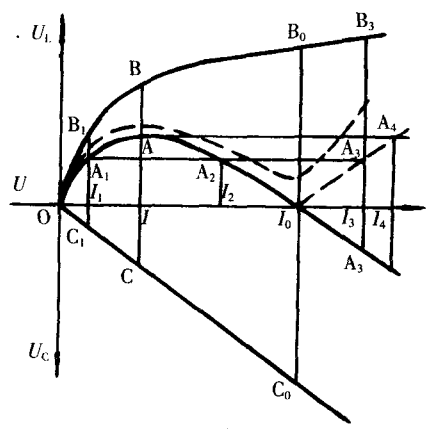
(a) 电路图 (b) 向量图
 Z_g —发电机的阻抗 Z_T —中间变压器或支撑变压器的阻抗
 Z_m —试品的激磁阻抗, Z_C —试品的容抗



(a)



(b)



(c)

图 9-25 电感和电容串联谐振

(a) 电路图 (b) 向量图 (c) 电压电流间关系曲线

确定,这曲线与铁心的磁化曲线相似。 $U_c=f(I)$ 由直线 OC 来确定。而由曲线 OB 与直线 OC 纵坐标之差即得曲线 OA_1AA_2 ,是 $U=f(I)$ 。

当施加 U 由低逐渐上升,电流 I 也增加,若外电压 U 到达 A 时, U_L 是 B 点, U_c 是 C 点,就到了极限(临界)电压,此时电流仍滞后于电压,若继续将电压升高,电流 I 则发生跃变,电流的值立即从 OI 增加到 OI_4 ,且发生了电流的相位翻转,即 I 将超前于 U 。此时 U_L 及 U_c 将其改变了 180° 。

由此可知,在开关合闸后,电压上升到一定值,发现电压和电流都较大,而且无规律地摆动,电压稍一上升,保护球隙就放电,这是接近谐振了。出现电压谐振时,电源端的电压都不高,由 $U=U_L-U_c$ 可知,当电阻很小时电流就相当大。

为了避免铁磁谐振,办法就是改变回路的参数,一般在电源端并联电抗器或改换试验电源的频率。

第八节 补 偿

上面提到避免同步发电机自励磁及铁磁谐振的产生,都采用并联电抗器的办法。因此补偿问题是感应高压试验中的关键问题,必须做充分地考虑,如果对这方面有所忽略或估计不足,将会使试验前功尽弃,无法保证变压器安全试验。

因为被试变压器容性阻抗是和发电机及中间变压器的阻抗相串联的,所以在试验中必然有两种情况发生:一种情况是回路电流对电源电势来说是呈感性的;另一种情况是回路电流对电势来说呈容性的。前一种情况在试验中是常见的,一般情况不需要补偿措施。后一种情况在 220kV 级以上变压器试验时是必定存在的。因此必须在被试变压器低压侧并联电抗器进行补偿。

【例】360 000/330 试品感应试验

(1)未补偿的计算:

①试品的有关数据

$$I_c=24.4\text{A}$$

$$I_M=1.9\text{A}$$

$$I_{w1}=9.5\text{A}$$

$$I=\sqrt{(24.4-1.9)^2+9.5^2}=24.4(\text{A}) \text{ (容性)}$$

$$\cos\varphi_2=\frac{9.5}{24.4}=0.39$$

$$Z_2=\frac{U_2}{I}=\frac{44\,000}{24.4}=1\,803(\Omega)$$

$$R_2=1\,803\times 0.39=703(\Omega)$$

$$X_{c2}=1\,803\sin 67^\circ=1\,803\times 0.92=1\,659(\Omega)$$

②发电机

$$X_d=3\times 4.1=12.3(\Omega)$$

$$r_d=3\times 0.054=0.16(\Omega)$$

折算到试品低压侧:

$$X_d'=12.3\times (6.42)^2=507(\Omega)$$

$$r_d'=0.16\times (6.42)^2=6.59(\Omega)$$

③中间变压器

10 000kVA:38.5 \pm 2 \times 2.5%/6.3kV YNd11

$$\text{电压比: } k = \frac{40.425}{6.3} = 6.42$$

$$Z_T = \frac{38.5^2}{10} \times 8\% = 12(\Omega) \quad (\text{每相})$$

$$\text{两相串: } 12 \times 2 = 24(\Omega)$$

$$\text{折算到 } 200\text{Hz: } Z_T' = 24 \times 4 = 96(\Omega)$$

$$r_T = \frac{53\,000}{3 \times 150} = 0.8(\Omega)$$

$$\text{两相串: } r_T' = 0.8 \times 2 = 1.6(\Omega)$$

④总的内阻抗

$$X_K = X_d' + Z_T' = 507 + 96 = 603(\Omega)$$

$$R_K = r_d' + r_T' = 6.59 + 1.6 = 8.19(\Omega)$$

$$Z_K = \sqrt{X_K^2 + R_K^2} = 603.1(\Omega)$$

⑤输出情况

$$\Sigma Z = \sqrt{(x_K - x_{C2})^2 + (R_K + R_2)} = \sqrt{(603 - 1\,659)^2 + (8.19 + 703)^2} = 1\,273(\Omega)$$

$$I = \frac{E}{\Sigma Z} = \frac{44\,000}{1\,273} = 34.56(\text{A})$$

$$U_2 = I Z_2 = 34.56 \times 1\,803 = 62\,312(\text{V})$$

$$\text{容升: } \Delta U\% = \frac{62\,312 - 44\,000}{44\,000} \times 100\% = 41.6\%$$

$$\text{充电容量: } P_x = I U_2 = 34.56 \times 62.312 = 2\,153(\text{kVA})$$

$$\text{是发电机容量的 } K = \frac{2\,153}{3\,544} = 0.61$$

由以上可知,容升为 41.6%,充电容量占发电机容量的 61%,自激磁还是严重的。因此有必要在发电机端并联电抗器进行补偿。

(2)补偿计算:

①按 $\cos\varphi_2' = 0.8$ 进行补偿,补偿电路见图 9-26。在发电机出口端并联电抗器。假设未计及电源内阻抗。

则补偿后:

$$\cos\varphi_2' = \frac{9.5}{\sqrt{(24.4 - I_L)^2 + 9.5^2}} = 0.8$$

$$I_L = 17.3\text{A} \approx 17\text{A}$$

需要补偿的电抗

$$X_L = \frac{44\,000}{17} = 2\,588(\Omega)$$

折算到发电机出口端

$$X_{Ld} = \frac{2\,588}{6.42^2} = 63(\Omega)$$

补偿后被试变压器的电源电流

$$I_2' = \sqrt{(24.4 - 17)^2 + 9.5^2} = 12(\text{A})$$

$$\text{阻抗 } Z_2' = \frac{44\,000}{12} = 3\,667(\Omega)$$

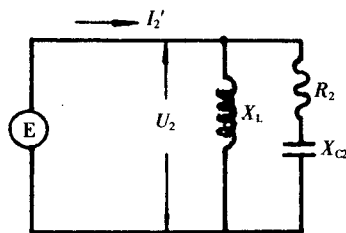


图 9-26 补偿电路图

X_L —并联电抗器

$$X_{c2}' = 3667 \sin 37^\circ = 2200 (\Omega)$$

$$R_2' = 3667 \cos 37^\circ = 2934 (\Omega)$$

②考虑电源内阻抗时

$$\text{总阻抗 } \Sigma Z = \sqrt{(603 - 2200)^2 + (8.19 + 2934)^2} = 3348 (\Omega)$$

$$\text{回路电流 } I = \frac{E}{\Sigma Z} = \frac{44000}{3348} = 13.1 (\text{A}) \quad (\text{容性})$$

$$\text{折算到发电机出口 } I_g = 13.1 \times 6.42 = 84.1 (\text{A})$$

③补偿后

$$U_2 = IZ_2' = 13.1 \times 3667 = 48038 (\text{V})$$

$$\text{容升: } \Delta U\% = \frac{48038 - 44000}{44000} \times 100\% = 9\%$$

补偿后电流仍是容性,但发电机的充电容量为: $P_s = 44 \times 13.1 = 576 (\text{kVA})$,是发电机充电容量的 $K = 540/3544 = 0.16$ 。

即发电机开关一合闸,电压自动上升只占额定电压的16%,降压时可以降至15%,同时容升很小,只有9%,因此试验可以顺利进行。一般情况采用欠补偿较为合适。

第九节 三相发电机运行不平衡的解决办法

分级绝缘变压器感应试验都采用单相电源。因此存在着发电机运行的不对称性问题。解决的办法,可以从改变发电机的定子绕组的接法或改变中间变压器线圈的接法来达到。

1 发电机的

三相定子绕组改为单相形式

其相当于单相同步发电机,接法见图9-27。

为了保持定子电流为额定值,则单相容量为:

$$S_1 = 2EI$$

与三相容量比

较:

$$\frac{S_1}{S_3} = \frac{2EI}{3EI} \times 100 = 67\%$$

实际上为了不超出端电压,则其单相容量为:

$$S_1 = \sqrt{3} EI$$

此时 $S_1 = 0.58 S_3$

(9-26)

这样改接成单相形式,就能使发电机运行平衡,机械振动就不会大。但是使用容量就降低了,只有原来的58%。

2 中间变压器的接法

其可改善发电机不平衡状态。如果发电机定子绕组Y死接时,可用Yd11中变来改善负载不平

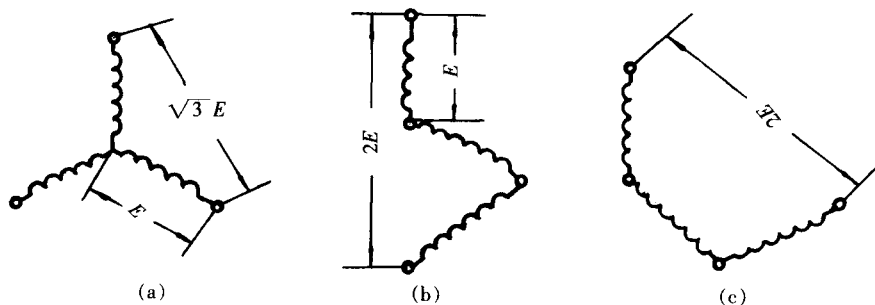


图9-27 发电机定子绕组的改接

(a)三相接法 (b)、(c)单相接法

衡。见图 9-28。

发电机三相供中变低压侧, 高压 AC 输出供单相负载。

则发电机的各相电流为:

$$I_a = I_b = \frac{1}{\sqrt{3}} KI \quad (9-27)$$

$$I_c = \frac{2}{\sqrt{3}} KI \quad (9-28)$$

上面的计算同样可以适用

于 DY 连接。从式(9-27)、式(9-28)可以看出, 虽然三相电流不平衡, $I_a = I_b = \frac{1}{2} I_c$, 但总比单相运行好得多, 减轻了不平衡程度。

3 采用中间变压器三相变单相

为了减轻发电机的三相不对称运行, 现将中间变压器一次绕组接成 Y, 二次绕组接成三相串联起来, 见图 9-29。

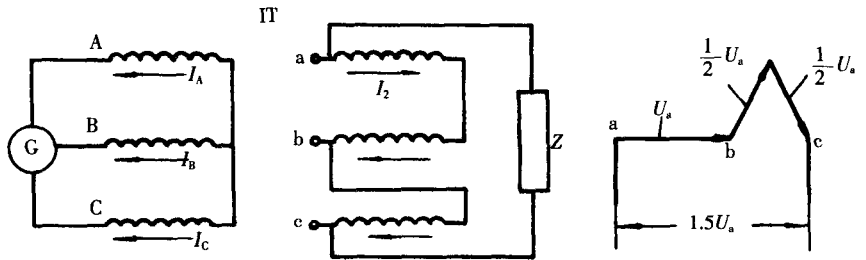


图 9-29 中间变压器三相变单相接线图

一次匝数均为 N_1

一次电压均为 U_1 (三相对称)

二次匝数 $N_b = N_c = \frac{1}{2} N_a$

二次电压 $U_b = U_c = \frac{1}{2} U_a$

则
$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_a}{N_a} = \frac{U_b}{N_b} = \frac{U_c}{N_c}$$

而
$$U_c = U_a + U_b \cos 60^\circ + U_c \cos 60^\circ = U_a \left(1 + \frac{N_b}{N_a} \cos 60^\circ + \frac{N_c}{N_a} \cos 60^\circ \right) = 1.5 U_a \quad (9-29)$$

由磁势平衡得:

$$N_1 I_A - N_a I_2 = 0 \quad I_A = -\frac{N_a}{N_1} I_2$$

$$N_1 I_B - N_b I_2 = 0 \quad I_B = \frac{N_b}{N_1} I_2$$

$$N_1 I_C - N_c I_2 = 0 \quad I_C = \frac{N_c}{N_1} I_2$$

所以
$$I_B = I_C = -\frac{1}{2} I_A \quad (9-30)$$

即三相电压对称, 而三相电流仍不对称, 虽然不理想, 但也能减轻不对称运行程度。

4 三相发电机单相运行

在图 9-30 中, 如果发电机的定子绕组是 Y 接, 同时没有合适的中变, 那么只有作单相运行。因

而要注意发电机的安全运行。

$$I_A=0$$

$$U_{BC}=U_B-U_C=IZ$$

$$Z=r-jX_c \quad (\text{假定负载是容性的})$$

$$\text{结果: } I = \frac{-\sqrt{3} E_0}{-jZ+X_1+X_2} \quad (9-31)$$

$$U_A = \frac{-1}{\sqrt{3}} I(-jZ+2X_2) \quad (9-32)$$

$$U_{BC} = \frac{-\sqrt{3} E_0 Z}{-jZ+X_1+X_2} = IZ \quad (9-33)$$

式中 E_0 ——A 相空载电势, V;

Z ——负载, Ω ;

X_1, X_2 ——发电机的正序、负序电抗, Ω 。

从式(9-31)中, 当 $Z=0$, I 与 E_0 间为 180° 关系。但由于负载 Z 的性质不同, 而有所变化。

- (1) 当 $Z=r-jX_c$, 忽略 r , $X_c < (X_1+X_2)$ 时, I 与 E_0 为 180° 反相关系。
- (2) 当 $Z=r-jX_c$, 忽略 r , $X_c > (X_1+X_2)$ 时, I 与 E_0 同相关系。
- (3) 当 $Z=r-jX_c$, 忽略 r , $X_c = (X_1+X_2)$ 时, 发生谐振, I 很大, U_{BC} 也将很大。
- (4) 当 $Z=r+jX_L$, 忽略 r , I 与 E_0 同相关系。
- (5) 当容性负载时, $(-jZ+2X_2) > (-jZ+X_1+X_2)$, 故 u_A 比 E_0 大。

必须注意 $X_c \neq X_1+X_2$, 若发生谐振, 感应试验就难以进行。同时电流也很大, 使发电机发热。另外, 还要注意无负载端 u_A 的电位, 不论 $X_c > X_1+X_2$, $X_c < X_1+X_2$ 的情况, 均使 $u_A > E_0$, 故必须注意其绝缘, 不能使 u_A 过高。

由于逆序电流的数值等于正序电流, 故逆序电流产生 2 倍周率的磁通, 使发电机发热。由于逆序磁场所产生的 2 倍周率的交变电磁力矩, 将同时作用在转子轴以及定子机座上, 引起振动, 这是不利的。为了削弱逆序磁场的作用, 要求发电机装有阻尼绕组, 因而使逆序电抗值要小得多, 就能减少转子损耗, 减少振动, 提高发电机担负不对称负载的能力。

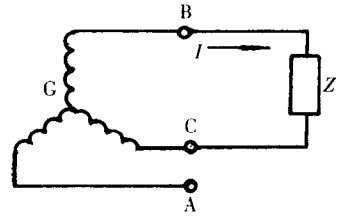


图 9-30 发电机单相运行

第十章 外绝缘试验及检测

第一节 概 述

电气设备的外绝缘指空气绝缘,包括纯空气间隙绝缘和沿面空气绝缘。对于油浸电力变压器来讲,就是指变压器套管的瓷套外表面绝缘、套管端部屏蔽环之间及对油箱或对储油柜的空气绝缘。

电气设备外绝缘的耐受电压能力,用耐受电压表示。耐受电压也称绝缘水平。绝缘水平用工频耐受电压(或操作波耐受电压)和雷电冲击耐受电压表示。耐受电压的数值,在国标GB311.1—1997和GB1094.3—2003标准中有规定。它和设备额定电压有关,并和保护水平相配合。设备的保护水平要和设备在运行中的过电压相匹配。电气设备就是用这种绝缘配合关系保证安全运行的。

电气设备外绝缘的放电电压要大于它的耐受电压。两者的关系是:耐受电压等于或小于概率为0.1的放电电压,这样,可以保证试品在耐受电压试验时不产生放电,或只产生极少次数放电(雷电和操作波冲击)。

设备外绝缘的放电电压值,与放电间隙的大小有关,也与放电部位的电极形状有关。

设备外绝缘的放电现象与试品的电场分布有关。在电场均匀和稍不均匀的试品上,只产生击穿(或闪络)现象;在电场极不均匀的试品上,会产生电晕现象、火花现象乃至击穿。

为了证明设备外绝缘的绝缘水平,保证设备绝缘的安全运行,对各类电气设备的外绝缘都要进行耐压试验或检测。试验项目有工频电压耐受试验(或放电试验)、操作波电压耐受试验(或放电试验)、雷电波电压耐受试验(或放电试验)。检测是对放电间隙尺寸的检测,或者说是对外绝缘的绝缘距离检测。而且对试验合格的试品可以不进行检测,对不宜进行试验的试品(或项目)可用检测方法代替试验方法,有关规定见国标GB10237—1988。

下面将对外绝缘放电分散性,外绝缘试验方法和试验条件作些说明。

第二节 放电电压的随机性

对试品外绝缘进行多次放电试验时,将得到多个放电电压值。并且,在试验之前不能知道它的确切值。因此说,放电电压具有随机性。

由于外绝缘放电电压具有随机性,并且,不同的电压值有不同的放电概率,所以要用区间值 $[u_0, u_m]$ 表示。

在区间 $[u_0, u_m]$ 中, u_0 是下限值,放电概率很小,接近0; u_m 是上限值,放电概率很大,接近1;在 u_0 与 u_m 之间的放电电压 u_i ,其放电概率 $P(u_i)$ 为:

$$0 \leq P(u_i) \leq 1$$

在实际试验中,由于试验次数不够多,不能给出放电概率 $P(u_i)$,而只能给出放电频率 f_i 和放电频率叠加值 Σf_i 。

放电电压和放电概率的关系称为放电电压的概率分布。对外绝缘来讲,它的概率分布服从正态分布。在实际试验中,由于试验次数不够多,放电电压服从 t 分布,方差服从 χ^2 分布。

由于放电的随机性,所以在规定试验方法时要考虑试验电压和概率的关系。

1 放电电压的放电频率

在实际试验中,由于试验次数不够多,不能对每个放电电压给出放电概率,而只能给出放电频率(f_i)和放电频率叠加值($\sum f_i$)。下面用实例加以说明。

例如,对一个外绝缘模型,采用多次升压试验方法,试验在不同时间进行,共进行了6次试验。在每次试验时,重复升压10次,取得10个放电电压数据;6次试验,共得到60个放电电压数据,把这些数据按试验顺序排列,列入表10-1。

由表10-1可知:60个数据并不完全相同,其中最小值是120,最大值是250,区间值是[120,250]。对每次试验来讲,10个数据也是区间值,分别为:[150,220]、[130,250]、[120,240]、[130,220]、[160,230]和[120,210]。对每次试验的平均值来讲,也是区间值,其值为[166,182]。并且,平均值的区间电压差小,单次试验的区间电压差大,6次试验的区间电压差更大。

现在,把60个电压数据按大小排列,见表10-2。由表10-2可知:不同数值的放电电压(u_i)的出现次数(m_i)不相同,对应的放电频率(f_i)不相同,对应的放电频率叠加值($\sum f_i$)也不相同。

表中 $f_i=m_i/n$ 。

2 试验电压的放电概率

为了说明试验电压(u)与其放电概率 $P(u)$ 的关系,再用实例作以下说明:

假设对一个试品采用逐步升压方法试验,出现的放电电压值(u_i)不会大于试验电压值(u),即:

$$u_i \leq u$$

假设对试品进行 n 次试验,得到的放电电压(u_i)个数也不会多于试验次数 n 。设放电次数为 m , $m \leq n$;不放电的次数(耐住试验电压的次数)为 $(n-m)$, $(n-m) \leq n$ 。

根据这些试验数据,就可以对试验电压的放电频率、耐受电压频率和放电概率、耐受概率写出表达式(亦称定义):

放电频率:

$$f(u) = m/n \quad (10-1)$$

耐受频率:

$$g(u) = (n-m)/n \quad (10-2)$$

放电概率:

$$P(u) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n} \quad (10-3)$$

表10-1 放电电压值($n=60$)

次序 组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
1	180	150	160	160	150	150	220	180	160	150	166
2	130	140	130	190	210	150	170	190	250	170	173
3	200	180	180	150	200	180	180	170	240	120	180
4	160	190	170	220	130	140	180	140	150	210	169
5	230	170	200	160	170	160	180	170	220	160	182
6	140	210	150	160	170	190	180	210	130	120	166

表10-2 放电电压数值大小排列表($n=60$)

放电电压 u_i/kV	放电次数 m_i	放电频率 f_i	放电电压 u_i/kV	放电次数 m_i	放电频率 f_i
120	2	0.033	190	4	0.067
130	4	0.067	200	3	0.050
140	4	0.067	210	4	0.067
150	8	0.133	220	3	0.050
160	8	0.133	230	1	0.017
170	8	0.133	240	1	0.017
180	9	0.150	250	1	0.017

耐受概率:

$$G(u) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n-m}{n} = 1 - P(u) \quad (10-4)$$

式中 $0 \leq P(u) \leq 1$

$0 \leq G(u) \leq 1$

$P(u) + G(u) = 1$

根据上述的表达式可知:试验次数 $n \rightarrow \infty$ 时,放电频率等于放电概率。在试验中,试验次数不够多,如 $n=20$,放电频率不等于放电概率。当试验次数增多时,放电频率向放电概率趋近,并趋向以放电概率为中心的稳定值。

如何根据放电频率估计放电概率,再借用表10-2中的数据进行说明:

首先把试验数据按大小排列,按电压级差(Δu)分组,列表。进而计算各组电压的放电频率(f_i)和放电频率叠加值(Σf_i)。然后,根据放电频率画直方图;根据放电频率叠加值画放电概率估计曲线。对表10-2中的数据讲,取电压级差 $\Delta u=20\text{kV}$,并分组列表,见表10-3。按表中数据画直方图,见图10-1;按表中数据画放电概率估计曲线,见图10-2。由图10-1、图10-2可以看出,外绝缘放电电压具有分散性,服从正态分布。

表10-3 电压分组统计表

分组电压 /kV	组中值 u_i /kV	次数 m_i	频率 f_i	频率叠加 Σf_i
115~135	125	6	0.100	0.100
135~155	145	12	0.200	0.300
155~175	165	16	0.266	0.566
175~195	185	13	0.216	0.782
195~215	205	7	0.118	0.900
215~235	225	4	0.067	0.967
235~255	245	2	0.033	1.000

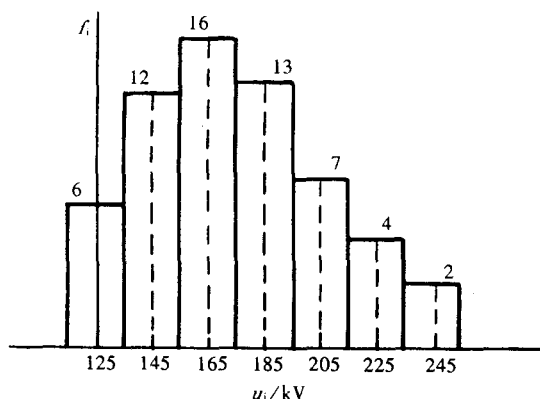


图10-1 直方图

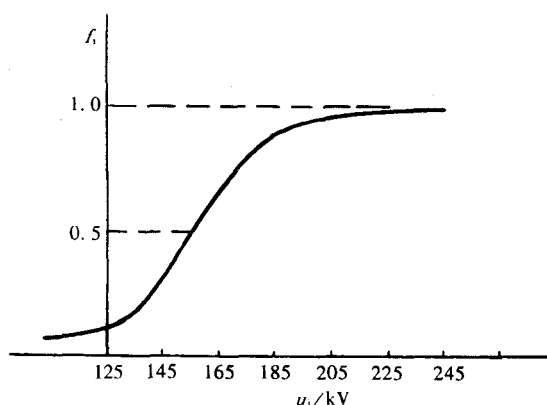


图10-2 概率估计曲线

表中的放电电压频率 f_i 和放电概率密度 $f(u)$ 对应;放电频率叠加值 Σf_i 和放电概率 $P(u)$ 对应。

第三节 外绝缘的试验方法

外绝缘的试验方法,包括产品外绝缘试验方法和研究性外绝缘的试验方法。两者是有一定差别的。

产品外绝缘的试验方法,包括耐受试验方法和放电试验方法。具体试验方法在国标GB311.3—1983、GB/T 16927.1—1997和产品标准中规定。试验时要满足产品技术条件和试验委托书的要求,要严格执行技术条件的规定。由于产品试验是受委托进行的,所以应该把技术条件(或委托书)放到

首位。至于产品技术条件和标准的不一致性,则由产品设计人员或委托单位负责处理。

研究性外绝缘的试验方法,不同于产品外绝缘的试验方法。产品试验的目的是证明产品的绝缘水平,试验方法要和绝缘配合相一致。研究性外绝缘试验的目的是掌握外绝缘特性,试验方法要给出外绝缘耐受电压和耐受概率、放电电压和放电概率以及放电电压的区间值,给产品设计者提供外绝缘数据。

不论对于产品试验,还是对于绝缘研究试验来讲,在试验之前,都要有认定的试验方案,并对被试品的名称和绝缘结构(或绝缘特点)、试验项目和试验方法、试验电压和试验条件以及试验结果的判断方法加以明确。

对复合绝缘产品的外绝缘试验来讲,施加的电压值不应高于内绝缘的绝缘水平。在试验时,如果内绝缘出现异常,应停止试验,对试品内绝缘进行检查和处理。下面将简要介绍9种外绝缘试验方法,供有关人员参考。

1 三次试验法

这种试验方法是冲击电压的试验方法。它用于复合绝缘产品的型式试验和出厂试验的基础方法,并且是证明试品具有额定耐受电压水平的试验方法。

这种试验方法中规定:对试品施加三次额定耐受电压,如果试品外绝缘没有产生闪络而内绝缘没有出现故障,那么试品通过试验;如果试品在一次试验时外绝缘产生闪络,就判定试品外绝缘没有通过试验;如果只有内绝缘出现故障,亦认为试验通过(外绝缘)。

为了保证试验工作进行和试验结果有效,试验人员要把施加电压前的准备工作作好。具体讲,试验人员要明确试验方案、确认试品、接好试验线路,并根据试品的海拔高度和试验时的场地大气条件对额定耐受电压进行校正,确定实际试验电压值。对试品施加第一次耐受电压时,采用逐级升压方法,同时观察试验现象,当试品的内绝缘没有出现异常现象,外绝缘没有产生闪络时,认定试品通过第一次耐受电压试验。然后,经过绝缘恢复的时间间隔(通常是1min),再对试品进行第二次耐受电压试验。第二次耐受电压试验通过之后,进行第三次耐受电压试验。三次试验都通过,判定试品外绝缘通过试验,证明试品具有额定耐受电压的绝缘水平。否则,判定试品外绝缘没有通过试验。

在每次耐受电压试验之后,试验人员要对试品进行检查,确认试品没有出现异常。当发现试品内绝缘出现异常时,应对试品进行处理或更换。对处理好的试品,可继续进行试验,并统一计算次数。对更换的试品,应视为新试品,需要重新进行三次耐受电压试验。

2 3+9次试验法

这是冲击电压的试验方法,用于复合绝缘产品的外绝缘试验,是型式试验所用的补充试验方法。

该试验方法规定:对试品施加3次额定耐受电压,在试品通过3次耐受电压试验后,判定试品通过试验,结束试验工作;在试品产生两次外绝缘闪络时,判定试品没有通过试验,亦结束试验工作;在试品产生一次外绝缘闪络时,则要对试品再进行9次耐受电压试验。9次均耐受住了,则试品通过。在9次耐受电压试验时,试品若再产生闪络,试验停止,判定试品没有通过试验。

在进行这项试验时,应做好试验前的准备工作和试验后的检查工作,以保证试验结果的有效性。并且,要用逐级升压方法对试品施加第一次耐受电压,用直接加压方法对试品施加其他各次的耐受电压。

3 15次试验法

这是冲击电压的试验方法,用于复合绝缘产品的外绝缘试验,是在型式试验时使用的基本试验

方法。

该试验方法和3次耐受电压试验方法相比,有相同之处,也有不同之处。相同之处是试验前和试验后的工作、试验之间的时间间隔、试验时的观察与判断。不同之处是内绝缘出现异常时,停止试验,对试品进行处理;在试品出现第3次闪络时,停止试验,判定试品外绝缘没有通过试验;在试品内绝缘正常,试验继续进行,直至试品通过第15次耐受电压试验。而外绝缘闪络没有超过两次时,试验之后,判定试品外绝缘通过试验,同理也认定试品内绝缘通过15次耐受电压试验(但试验电压要和内绝缘的耐受电压等值)。

该试验方法的加压次数较多,并且有的产品标准(或产品技术条件)还规定两种极性电压试验,使试品经受30次额定耐受电压试验。所以存在不同意见,并建议采用3+9次试验方法。

4 多级加压法试验

这是冲击电压的放电试验方法,用于自恢复绝缘试验。

5 升降法

为了得到试品50%放电的冲击电压估计值 \hat{u}_{50} 和 \hat{u}_{50} 的均差 S ,常采用这个方法。

6 连续升压法

这个试验方法用于试品的工频电压放电试验,或用于试品的直流电压放电试验,也可用于冲击电压的波前放电试验。

7 得到小概率放电电压的试验方法

这种试验方法,适用于自恢复绝缘试品,也适用于非自恢复绝缘试品的绝缘特性研究。

它的基本原则是对试品进行分级多次(25次)耐压试验,直到试品出现放电。具体讲,试验步骤如下:

(1)选择第一次施加的电压 u_1 和级差电压 Δu 。 u_1 是根据试品耐受电压估计的。试品在 u_1 的3次作用下不应产生放电现象。 Δu 是根据 u_1 选择的,取 $\Delta u=(0.02\sim 0.05)u_1$ 。

(2)逐步升高试验电压,达到 u_2 值。先对试品施加3次 u_1 ,试品不产生放电。然后升高试验电压 Δu ,试验3次。依此类推,直到试品出现放电(只要求出现1次),得到对应的放电电压 u_2 。

(3)确定试验电压 u_3 值。由于试品出现放电,故要求降低试验电压。降低后的试验电压称为 u_3 , $u_3=u_2-3\Delta u$ 。

u_3 确定后,用 u_3 对试品进行25次试验。试验时,可能出现两种情况,即:25次耐住,没有产生放电;25次没耐住,产生放电。

(4)在25次 u_3 耐住情况下,求小概率放电电压。当试品耐住25次 u_3 时,升高试验电压 Δu 再试25次。依此类推,直到试品出现1次放电为止。

这时,就把试品耐住25次的试验电压最大值称为试品小概率放电电压。其放电概率的值是1%;置信度0.98的概率区间值是 $[0, 8]$ 。

(5)在25次 u_3 下产生放电,就要降低试验电压 $2\Delta u$ 再试25次。如果试品不再放电,再升高试验电压 Δu 再试25次(否则,再降低试验电压 $2\Delta u$)。直到试品再出现1次放电为止。这时,就把升压过程中的耐住25次的试验电压最大值作为小概率放电电压。

8 多次耐受电压的试验方法

多次耐受电压的试验方法是采用级电压的试验。级电压的数值关系为:

$$u_1 < u_2 < u_3 < \cdots < u_m$$

级电压之间的差值 Δu ,根据试品的标准偏差估计,通常取 $\Delta u=(0.2\sim 0.8)\sigma$ 。

试验时把某级试验电压 u_i 施加于试品,并施加 n 次, $n>1$ 。如果试品在 n 次试验中没有出现放电,称 u_i 为全耐受电压;如果试品在 n 次试验中出现1次放电,称 u_i 为未全耐受电压。试验方法,按升降法原则,在试品全耐受住试验电压时升一级;在试品未全耐受住时降一级。反复进行多次试验之后,统计全耐受电压的分布情况,明确全耐受电压的数值范围及电压级数(N),以及各级全耐受电压的次数(k_i)。

具体讲,首先取 u_1 对试品进行 n 次试验。当试品没有出现放电时,把试验电压升高到 u_2 再试验 n 次。如果试品仍未发生放电,再把试验电压升高到 u_3 试验。如果试品在 u_3 的某一次加压过程中出现放电,这时就把试验电压降到 u_2 再试验 n 次。在 u_2 的再次试验中,若没有出现放电,把试验电压再升高到 u_3 试验 n 次。如果在 u_3 下不再出现放电,这时就把试验电压升高到 u_4 。如此反复多次之后,得到多个全耐受电压。根据全耐受电压 u_i 的分布情况,计算全耐受电压的平均值(\bar{u})。计算式为:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^N k_i u_i}{\sum_{i=1}^N k_i} \quad (10-5)$$

式中 u_i ——全耐受电压,kV;
 k_i ——全耐受电压 u_i 的出现次数;
 N ——全耐受电压的级数;
 $\sum k_i$ ——各级全耐受电压出现的总次数。

根据全耐受电压的分布,可知试品耐受 n 次 \bar{u} 的概率 $[q(n)]$ 为:

$$q(n)=0.5 \quad (10-6)$$

根据试品耐受一次 \bar{u} 和耐受 n 次 \bar{u} 的概率关系,可知:

$$q(n)=[q(1)]^n \quad (10-7)$$

$$\text{或} \quad q(1)=[q(n)]^{\frac{1}{n}} \quad (10-8)$$

式中 $q(1)$ ——试品耐受一次 \bar{u} 的概率,%;
 $q(n)$ ——试品耐受 n 次 \bar{u} 的概率,%。

根据上式可以得到试品耐受一次 \bar{u} 和耐受 n 次 \bar{u} 的概率值,具体的数值关系见表10-4。

表10-4 $q(1)$ 和 n 的数值关系

级电压的施加次数 n	1	2	3	4	7	14	34	70
耐受 \bar{u} 一次的概率 $q(1)$	0.5	0.7	0.8	0.85	0.90	0.95	0.98	0.99

通过上述可知:采用多次耐受法试验,可以得到大概率耐受电压的数值,或小概率放电电压的数值,以及耐受电压和耐受概率的数值关系。

第四节 试验条件

为了保证试验的安全和试验结果的有效,试验人员要执行与试验有关的规定,并保证符合试验条件和试验要求。

1 试验设备

高电压试验设备包括工频电压设备、冲击电压设备和直流电压设备。各个设备包括电源设备和测量设备。电源设备是产生试验电压的,其电压的波形和幅值应满足试验要求。测量设备是指示试

验电压的,其准确度应符合要求。试验设备详见第八章等有关内容。

1.1 冲击电压设备

冲击电压设备由冲击电压发生器、负荷电容和冲击测量系统组成。

冲击电压发生器由多级电容器组成,利用并联充电和串联放电的方法把电压升高,达到试验电压的要求。冲击电压发生器的输出电压可表示为:

$$u = \eta n u_0 \quad (10-9)$$

式中 u_0 ——冲击电压发生器的实际充电电压,V;

n ——冲击电压发生器的实际串联级数;

η ——冲击电压发生器的效率,%。

冲击试验的等值接线方式见图10-3。

试验回路中的部件参数,都对冲击电压发生器的输出电压幅值(或效率)、波前时间(T_1)和波长时间(T_2)产生影响。在不计测量系统和试品电容量的条件下,根据经验写出的表达式为:

$$\text{电压效率} \quad \eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{波前时间} \quad T_1 = (2.3 \sim 2.7) \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot R_1$$

$$\text{波长时间} \quad T_2 = (0.7 \sim 0.8) (C_1 + C_2) R_2$$

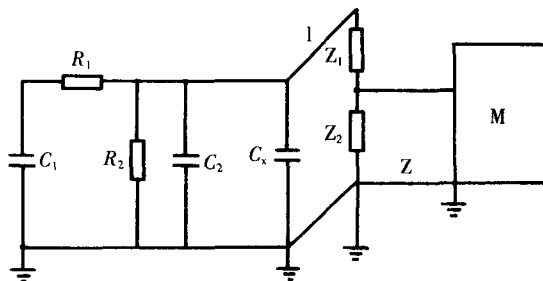


图10-3 冲击试验的等值接线方式

C_1 —发生器的主电容 C_2 —发生器的负荷电容 C_x —试品的等值电容 R_1 —波前电阻 R_2 —波长电阻 Z_1, Z_2 —分压器
1—分压器的高压引线 M—电压指示仪 Z—分压器的测量引线(同轴电缆)

对于雷电冲击全波参数,GB/T 16927.1—1997中规定:其电压值用峰值表示, $T_1=1.2\mu s$, $T_2=50\mu s$ 。允许偏差为:电压值 $\pm 3\%$ 、 $T_1 \pm 30\%$ 、 $T_2 \pm 20\%$ 。在电压峰值附近,允许存在幅值不大于5%峰值的高频振荡分量或过冲分量;当振荡频率 $f \geq 0.5\text{MHz}$ 或过冲时间 $t \leq 1\mu s$ 时,试验电压的波形用振荡(或过冲)的平均曲线表示,电压值用平均曲线的峰值表示;当振荡频率 $f < 0.5\text{MHz}$ 或过冲时间 $t > 1\mu s$ 时,试验电压的波形用实际电压波形表示,电压值用实际电压峰值表示;当高频振荡分量存在于波前,并且是在0.9峰值以下时,可不计它的影响。

对于操作冲击波的参数GB/T 16927.1—1997中规定:其电压值用峰值表示,波前时间 $T_1=250\mu s$,波长时间 $T_2=2500\mu s$ 。允许偏差为:电压值 $\pm 3\%$ 、 $T_1 \pm 20\%$ 、 $T_2 \pm 60\%$ 。在长空气间隙($s > 4\text{m}$)试验时,要记录实际电压波形,标明波形参数。

冲击电压的测量系统,由1、 Z_1 、 Z_2 、Z和M组成(见图10-3)。系统中的每一个元件参数,都对测量准确度产生影响。所以就要求元件参数稳定,连接方式固定,并且要消除临近效应和电磁干扰。

测量系统的校正,按GB/T 16927.1—1997规定,采用比对校正方法。比对的标准,可以是放电的球隙,亦可以是被认可的冲击测量系统。

测量系统中的电压指示仪表,应定期送检。电压指示的刻度,用标准传递方法校正。

1.2 直流电压设备

直流电压设备由交流电源和整流设备组成。

直流电压值,用电压的算术平均值表示。其波纹系数应不大于3%。电压值的允许偏差:在试验电压的持续时间不大于60s时,允许 $\pm 1\%$;在试验电压的持续时间大于60s时,允许 $\pm 3\%$ 。

直流电压设备的额定电压(或允许工作电压)应大于试品的试验电压,并留绝缘裕度。

直流电压设备的输出电流,决定于试品的电容电流、介质吸收电流、泄漏电流和局部放电电流。并且要求:试验设备要在短时间(如:20s)内把试品电压升到试验电压值;试品出现非破坏性放电时,试品电压不降低10%。

直流电压的测量方法,是电压分压器测量方法。测量设备要定期校正。校正方法是对比法。对比标准有球隙放电标准、棒对棒间隙放电标准。或用被认可的测量设备。

其中,棒对棒间隙放电标准,见GB/T 16927.1—1997的附录C。标准规定棒电极可以是铜棒,也可以是钢棒;棒极截面是正方形,边长15mm~25mm。棒电极可以水平布置,也可垂直布置。在水平布置时,棒长应不小于1m;在垂直布置时,上电极棒长应不小于2m,下电极棒长应不小于1m。在棒电极和高电压引线的连接部,加装屏蔽环,环的直径700mm,环的高度300mm。棒电极到周围物体的距离应大于5m。

标准大气条件下,棒间隙的放电电压值用下式计算

$$u_0 = 2 + 0.534d \quad (10-10)$$

式中 u_0 ——棒间隙的放电电压,kV;

d ——间隙尺寸,mm。

并且,棒间隙要满足 $250\text{mm} \leq d \leq 2500\text{mm}$ 的要求;空气绝对湿度(h)和相对密度(δ)之比要满足 $1\text{g}/\text{m}^3 \leq h/\delta \leq 13\text{g}/\text{m}^3$ 的要求。

$$\text{其中, } \delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \quad (10-11)$$

式中 p_0 ——标准大气压力(101.3kPa);

p ——试验时,试验场地的实际大气压力,kPa;

t_0 ——标准大气温度(20℃);

t ——试验时,试验场地的实际大气温度,℃。

棒间隙放电电压的取值方法:连续升压至放电10次,取指示平均值。然后,对平均值进行大气条件校正,得到标准大气条件对应的指示值,即 u_0 对应的指示值。 u_0 根据式(10-10)计算得出,并按计算值给指示值定刻度。

2 试验布置

通常情况下,试验场地和试验设备是确定的,所以,试验布置的主要工作是给试品和分压器选定放置位置、给高电压连接线选定接线方式、给地线选定接线方式。

2.1 试品的放置位置

试品放置的位置,应在地网接线端的附近,使试品能够就近接地,缩短地线长度。并且要考虑试品及其高电压引线的绝缘距离。

2.2 分压器的放置位置

分压器是高电压测量设备,高压端要和试品直接连接。两者之间的连线要尽量地缩短。

分压器的接地端,要直接和地网的接地端子连接。并且要和试品共用一个接地端。

2.3 高电压的接线方式

做冲击电压试验时,试品和冲击电压发生器是直接连接的。两者的连线要尽量短,以减小引线电感;做工频电压试验时,在试品和工频设备之间要串联保护电阻,以限制试品闪络过电压和限制试品闪络电流。

不能把高电压测量设备接在试品与高电压设备之间,应接在试品的后边,使试品电流不流过测

量回路。

试品的高压接线方式,在有的产品标准中规定高压接线方式,规定高压导线的形状和尺寸。在有的产品标准中,则没有这种规定。但是,所有的高电压导线和试品的夹角都不应小于 90° ;在试验电压下,高电压导线也不应出现火花放电。为了消除试品端部的火花放电,允许给试品加装屏蔽罩。

2.4 绝缘距离

试品与周围物体的绝缘距离、测量设备与周围物体的绝缘距离、高压导线与周围物体的绝缘距离,都应是不出现击穿放电现象的距离。并且,周围物体对试品电压分布的影响,应减小到忽略不计的程度;周围物体对测量设备的影响,也应减小到忽略不计的程度(即邻近效应应符合要求)。因此规定:干试时,试品到周围物体的距离应不小于试品外绝缘距离的1.5倍;湿试时,可以缩小这个距离。

2.5 地线的连接方式

通常的情况下,试验场地有接地网和相应的接地端子,使电压设备、试品和测量设备能够就近接地,接地线的长度应尽量缩短。在地网设计上应有工作接地和保护接地。但是,在实际工作中,有的把两者分开运行,有的则把两者连接一起运行。在地网运行方式上,要特别注意的是:明确实际试验场地的地电位升高和跨步电压增大;要对低压电源进行过电压保护,限制低压系统的过电压。

3 试验电压的修正和校正

如果设备外绝缘是空气绝缘时,由于空气绝缘的放电电压与大气条件(空气的压力、温度和绝对湿度)有关,所以在规定设备额定耐受电压(u_{RW})时,就规定了设备正常运行条件和标准参考大气条件。

设备正常运行条件在国标 GB311.1—1997 中有规定,其内容是:

设备安装地点的海拔高度不高于 1 000m;

设备安装地点的空气最高温度不高于 40°C 。

试验场地的标准参考大气条件,在国标 GB/T 16927.1—1997 有规定,其内容是:

空气温度: $t_0=20^\circ\text{C}$;

大气压力: $p_0=101.3\text{kPa}$;

绝对湿度: $h_0=11\text{g/m}^3$ 。

设备额定耐受电压(u_{RW}),或在国标 GB311.1—1997 中规定,或由产品技术条件给出。其电压值与正常运行条件和标准参考大气条件相对应。当设备运行条件不符合规定条件时,外绝缘的耐受电压要进行修正,其修正系数有海拔修正系数(K_a)和温度修正系数(K_b)。当试验场地的大气条件不是标准参考大气条件时,外绝缘的耐受电压和放电电压要进行校正,其校正系数(K_1)包括空气相对密度校正系数(K_1)和空气湿度校正系数(K_2)。所以,试品的实际试验电压(u)为:

$$u=K_a \cdot K_b \cdot K_1 \cdot u_{RW} \quad (10-12)$$

式中 $K_1=K_1 \cdot K_2$ (湿试电压不计 K_2)。 (10-13)

为了正确地使用式(10-12)和式(10-13),还要对式中的参量作出说明。

3.1 额定耐受电压(u_{RW})

额定耐受电压是电力设备的绝缘水平。各个电力设备的额定耐受电压都要符合国标 GB311.1—1997 规定。因为 GB311.1—1997 是基础标准,产品标准应满足它的要求。

额定耐受电压是根据电力设备的保护水平确定的。电力设备的保护水平是过电压保护设备(如:避雷器)的特性,其数值由最高工作电压(u_m)、暂态过电压、操作过电压和大气过电压决定。电力设备的绝缘水平和保护水平是配合的。两者的配合关系要满足以下要求:

$$BIL \geq K_L U_{PL} \quad (10-14)$$

$$BIS \geq K_S U_{PS} \quad (10-15)$$

式中 BIL——大气过电压要求的绝缘水平, kV;

BIS——操作过电压要求的绝缘水平, kV;

U_{PL} ——大气过电压的保护水平, kV;

U_{PS} ——操作过电压的保护水平, kV;

K_L ——配合系数, 通常取 1.25; 在 GB311.1—1997 中, K_L 取 1.4;

K_S ——配合系数, 取 1.15。

3.2 K_a 的计算方法

K_a 是修正额定耐受电压的。 K_a 的数值按国标 GB311.1—1997 中给出的方法计算, 即:

$$K_a = \frac{1}{1.1 - H \times 10^{-4}} \quad (10-16)$$

式中, H 是设备安装地点的海拔高度(m)。当 $1\,000\text{m} < H \leq 4\,000\text{m}$ 时, 按式(13-16)计算 K_a 的数值。当 $H \leq 1\,000\text{m}$ 时, $K_a = 1$ 。当 $H > 4\,000\text{m}$ 时, 尚无计算方法。

K_a 的数值只与设备安装地点的海拔高度有关, 与试验地点的海拔高度无关。当设备安装运行在高海拔, 而试验地点是低海拔时, 要用 K_a 对 u_{RW} 进行修正。当设备安装运行在高海拔, 试验地点也是高海拔时, 仍要用 K_a 对 u_{RW} 进行修正。试验地点的海拔变化, 大气条件就会跟着变化, 因而 K_a 的数值变化, 实际试验电压也变化, 这样才能使试验电压得到统一。

3.3 K_b 的计算方法

K_b 也是修正额定耐受电压的。 K_b 的数值按国标 GB311.1—1997 给出的方法计算, 即:

$$K_b = 1 + 0.003\,3(t_m - 40) \quad (10-17)$$

式中 t_m ——设备安装地点的最高空气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

当 $t_m > 40^{\circ}\text{C}$ 时, 按有关公式计算 K_b 的数值; 当 $t_m \leq 40^{\circ}\text{C}$ 时, 则 $K_b = 1$ 。

3.4 K_t 的计算方法

K_t 是校正试验电压的。 K_t 的数值按国标 GB/T 16927.1—1997 给出的方法计算, $K_t = K_1 \cdot K_2$ 。其中 K_1 是试验场地在试验时的空气密度校正系数; K_2 是试验场地在试验时的空气湿度校正系数。两者的数值计算方法分别为:

(1) K_1 的数值计算:

K_1 的数值按国标 GB/T 16927.1—1997 给出的方法计算, 即

$$K_1 = \delta^m \quad (10-18)$$

式中 δ ——空气相对密度, 由式(10-11)给出;

m ——空气相对密度指数。

其中, m 的数值按图 10-4 给出的关系选定。 m 的数值和变量 G 有关。 G 的数值用下式计算:

$$G = \frac{u_B}{500L \cdot \delta \cdot k} \quad (10-19)$$

式中 u_B ——试品的 50% 放电电压, 或

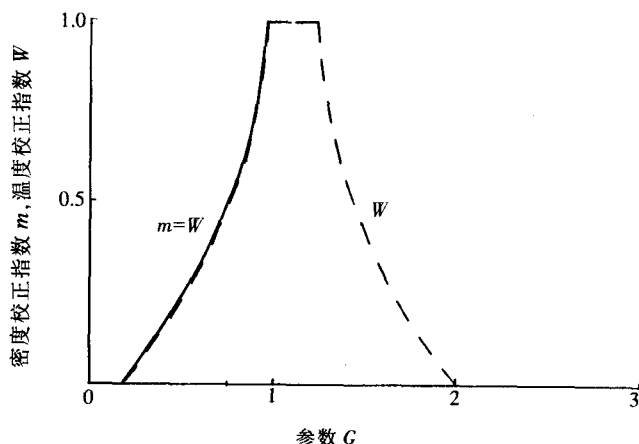


图 10-4 空气密度校正指数 m 值和湿度校正指数 W 与参数 G 的关系曲线

根据耐受电压估计, $u_b =$

$\frac{u_{RW}}{1-1.3\sigma}$, σ 为放电电压分布的相对标准偏差, 在标准中给出的数值为: 操作波试验取 $\sigma=0.06$, 雷电波试验取 $\sigma=0.03$;

L ——试品外绝缘的间隙长度, m;

δ ——空气相对密度;

k ——按图 10-5 查出。

(2) K_2 的数值计算:

K_2 的数值按国标 GB/T 16927.1—1997 给出的方法计算得出, 即

$$K_2 = K^W \quad (10-20)$$

式中 W ——按图 10-4 给出的关系查出;

K ——按图 10-5 给出的关系查出。

在图 10-5 中的 h 参量, 称为空气的绝对湿度。 h 的数值, 用实测方法得到。

3.5 实际干试耐受电压

对试品施加的实际干试耐受电压值, 常常不等于额定耐受电压值, 需要对额定耐受电压进行修正和校正。修正和校正的方法为:

$$u = K_a \cdot K_b \cdot K_i \cdot u_{RW} \quad (10-21)$$

当电力设备的运行条件符合正常运行条件时, 就取 $K_a=1, K_b=1$ 。这时, 就只进行校正, 即:

$$u = K_i \cdot u_{RW}$$

上述的修正方法, 适用于各种运行条件的设备外绝缘试验, 与试验场地的海拔高度和环境温度无关。上述的校正方法, 适用于各种海拔高度的试验场地, 对任何运行条件的设备外绝缘试验都要进行大气条件校正 (K_i)。

3.6 对实际放电电压的校正

在非标准大气条件下, 对试品进行外绝缘放电试验, 得到的相应放电电压值, 称为实际放电电压。因而要把这些电压值校正到标准参考大气条件, 以便进行数据比较。该校正称为反校正, 校正方法为:

$$u_0 = \frac{u}{K_i} \quad (10-22)$$

式中 u ——实际放电电压, kV;

u_0 ——标准参考大气条件对应的放电电压, kV;

K_i ——大气条件校正系数(计算方法同前, $K_i = K_1 \cdot K_2$)。

4 淋雨试验及淋雨试验的条件

为什么要对电力设备外绝缘进行淋雨试验? 为什么只对某些外绝缘进行淋雨试验, 而对另一些外绝缘不进行淋雨试验? 这是因为电力设备在雨天也要运行, 雨水会影响一些外绝缘的放电电压,

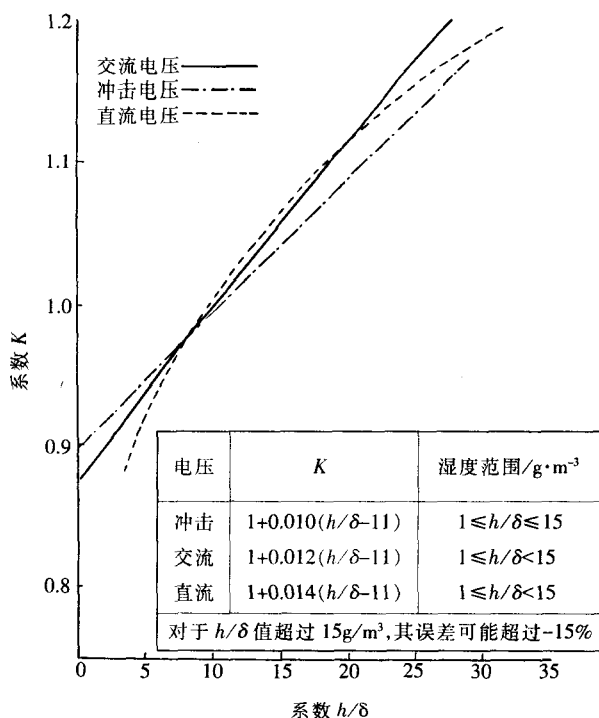


图 10-5 K 与 h/δ 的关系曲线 (h 为绝对湿度, δ 为相对空气密度)

但是雨水不会影响所有外绝缘的放电电压。纯空气间隙的外绝缘,在各种波形的试验电压(工频电压、操作波冲击电压和雷电波冲击电压)下,它的湿试放电电压和干试放电电压没有明显差别,所以就不规定淋雨试验。绝缘子串、支持绝缘子和瓷套管的外绝缘,在雷电波冲击电压下,它的湿试放电电压和干试放电电压无明显差别,所以对它也不规定淋雨试验。绝缘子串、支持绝缘子和瓷套管的外绝缘,当放电间隙小于 4m 时,在工频电压下,它的湿试放电电压会低于干试放电电压,所以对它规定淋雨试验。但是,在放电间隙大于 4m 时,电压分布极不均匀,它的工频湿闪电压还会高于干闪电压,所以对它就可不规定淋雨试验。

在操作波冲击电压下,绝缘子串的干闪络电压有极性效应,湿闪络电压没有极性效应,或两极差别很小。并且,干闪络电压与波前时间有关,湿闪电压与波前时间无关。所以,对它也常常不规定淋雨试验。

就具体产品的外绝缘来讲,它是否应进行淋雨试验,要依产品标准而定。当产品标准有规定时,进行淋雨试验;当产品标准没有规定时,不进行淋雨试验。这是确定试验项目的原则,产品设计者要严格遵守。

淋雨试验条件,由国标 GB/T16927.1—1997 规定。对试验用雨水的要求,见表 10-5。

表 10-5 标准湿试程序的淋雨状态

分 类		单 位	数 值
所有测量点的 平均淋雨率	垂直分量	mm/min	1.0~2.0
	水平分量	mm/min	1.0~2.0
单独每次测量和每个分量的极限值		mm/min	平均值 ± 0.5
收集到的雨水温度		℃	周围环境温度 ± 15
收集的水校正到 20℃ 的电阻率		$\Omega \cdot m$	100 ± 15

规定淋雨条件,其目的是统一试验条件,保证试验数据的统一。在标准中规定的淋雨条件,不是根据各个地区的实际降雨情况,而是根据淋雨条件对湿闪络电压的影响来决定。各个地区的实际降雨情况,差别很大,很难统一。

淋雨试验时,淋雨条件变化,湿闪络电压也会随之变化。所以,在标准中规定了淋雨率、淋雨方向和雨水的电阻率。

淋雨率,即单位时间的降雨量,其单位是 mm/min。平均淋雨率用两个方向的淋雨率来表示。其中一个为试品垂直面的淋雨率,称为垂直方向淋雨率;另一个是试品水平面的淋雨率,称为水平方向淋雨率。两个方向的淋雨率,随着淋雨方向变化而变化,见图 10-6。

假设淋雨方向与地平面的夹角是 45°,两个方向的淋雨率相等,见图 10-6(a)。因为垂直面的淋雨量和 S_1 面的淋雨量相等,水平面的淋雨量和 S_2 面的淋雨量相等, $S_1=S_2$,所以两个方向的淋雨率相等。

假设淋雨方向与地平面的夹角为 60°,两个方向的淋雨率就不相等,见图 10-6(b)。因为 $S_1=\frac{1}{2}S_2$,垂直面的淋雨量减小,所以垂直面的淋雨率也减小。

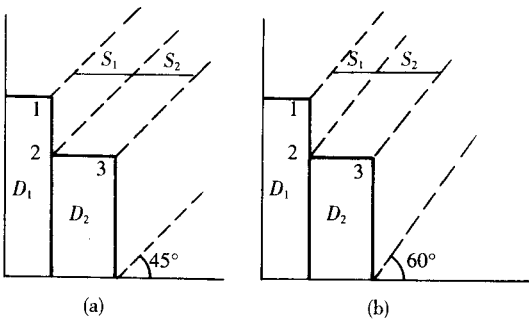


图 10-6 量雨器的放置

图中 D_1 是垂直方向的量雨器, D_2 是水平方向的量雨器。 D_1 的开口是 1-2,接收来自平面 S_1 的雨水; D_2 的开口是 2-3,接收来自平面 S_2 的雨水;两个开口的形状相同,面积相等,并相互垂直。两个量雨器相邻,但不相通,分别给垂直方向淋雨率和水平方向淋雨率的计算提供雨量。

平均淋雨率要用两个方向的淋雨率表示,不能只用一个方向的淋雨率表示。淋雨率的数值,要分别测量和分别计算,不能混合起来计算。淋雨率的指示值是各个测量点的测量平均值,不是一个测量点的测量平均值。淋雨率的指示值,允许变化,变化范围是 1.0~2.0mm/min;一个测量点的一次测量值,与平均值允许有 0.5mm/min 的偏差。所以,两个方向的淋雨率之比,可以是 1:1,也可以是 1:2 或 2:1。因而,淋雨的方向角就可能是 45°、60°或 26.6°。这样大的角度变化,影响较大,故要加以限制,使其保持在 45°左右。

根据以上所述,喷洒到试品表面的雨水是比较均匀分布的,上、中、下三个部位的淋雨率偏差不大于 0.5mm/min。虽然淋雨率的数值允许变化,但淋雨方向应变化不大,故两个方向的淋雨率应基本相等。

再者,标准规定的雨水电阻率是 20℃水温时的电阻率,其值为 $(100 \pm 15) \Omega \cdot \text{m}$ 。因为水温和电阻率的数值有关,故又规定雨水样本温度和试验环境温度之差不得超过 15℃。并且,还要对雨水电阻率进行温度校正,以保证试验雨水的统一。试验用水的样本,要从喷洒到试品的雨水中抽取,不得从贮水罐中抽取,也不得从流过试品表面的雨水中抽取。因为三种样本的水质差别很大,只有第一种样本的水质才能代表实际情况,才能代表影响试品闪络电压的水质。为了减少试品表面脏污的影响,通常还规定预淋雨时间。

下面再对四个具体问题作出说明。

(1) 雨水电阻率的测量方法和温度校正方法

雨水电阻率可依据雨水电阻确定。电阻和电阻率呈直线关系,可用下式表示。

$$\rho_t = R_t \cdot \frac{S}{l} \quad (10-23)$$

式中 R_t ——雨水样本的温度等于 t 时的电阻测量值, Ω ;

ρ_t ——和雨水样本温度 t 相对应的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;

l ——测量器中的两个电极间的距离, m;

S ——电极之间的通流截面, m^2 。

电阻的测量器具,可用一根细长的玻璃管制成。管长约 1m,在管的两端加装金属电极,电极要插入管内 3cm,电极的截面可以小于管的截面。电极间的距离要保持不变。通流的截面 S 等于玻璃管内截面(即水的截面)。电阻率的温度校正,乃是把水温为 t 的电阻率值校正到 20℃时的值。校正系数按图 10-7 选值,校正值按下式计算,

即:

$$\rho_{20} = \alpha(t) \cdot \rho_t \quad (10-24)$$

式中 ρ_t ——根据电阻 R_t 计算的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;

$\alpha(t)$ ——与水样温度(t)对应的校正系数。

(2) 水电阻率的调节

淋雨试验用水,常常是用蒸馏水和自来水混合而成的。因为蒸馏水的电阻率较大,自来水的电阻率较小,两者按一定比例混合之后就可达到试验用水的要求。

因为自来水中的导电杂质含量变化

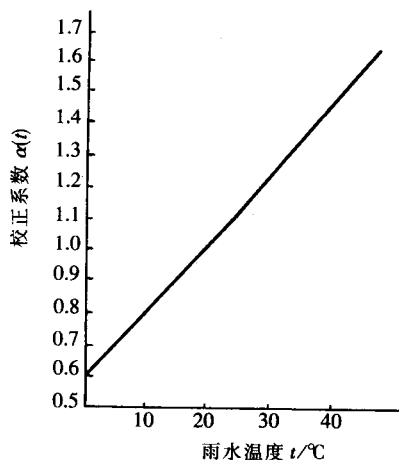


图 10-7 雨水电阻率的温度校正系数 $\alpha(t)$ 与温度 t 的关系

很大,其电阻率变化较大,所以两者的混合比例,很难统一规定(一般来讲,自来水约占 1/5)。

两者的混合方法为逐次地往蒸馏水中加自来水,并且,一次加入的自来水不能太多。每次加入自来水之后要对混合水进行搅拌,待水平静数分钟之后取样测量水的电阻和计算水的电阻率。经过多次加入和多次测量之后,取得经验就可以推断出混合比例。

上述的水电阻率,乃是贮水箱中的水电阻率,不是试品附近取样的水电阻率。

水箱中的水电阻率要大于规定值,可达到 $200\Omega\cdot\text{m}$ 。水箱中的水电阻率会随着时间的推移而降低,淋雨设备的管道和喷嘴会降低水的电阻率,喷水时通过空气之后水的电阻率也会降低。

(3)对淋雨设备的要求

淋雨设备包括贮水箱、喷嘴、喷嘴架和升降装置。贮水箱是贮存试验用水的。为了把水喷到试品表面,要给贮水箱加压,使水自动喷出,所以水箱应密封。为了保持水的清洁,水箱盖应能打开,以便清理箱内污垢。喷嘴是淋雨设备的关键部件,在国标 GB/T16927.1—1997 中有推荐结构。但是,允许使用其他结构。喷嘴架是安放喷嘴的部件。喷嘴在喷嘴架上能够改变喷水方向,从而保证喷水均匀。喷嘴布置:水平距离约 200mm,垂直距离约 300mm。升降装置是改变喷嘴架高度的设备。试品离地面较高时,把喷嘴架升高;试品离地面较低时,把喷嘴架降低。使喷雨的角度达到规定的 45° 。

对淋雨设备的要求有如下几条:

①喷洒到试品表面的雨水呈滴状,分布均匀。对水滴的大小,没有规定。淋雨率的不均匀性,应不大于 $0.5\text{mm}/\text{min}$ 。

②喷洒到试品表面的雨水,应从斜上方落到试品表面,不应是直射到试品表面。因为直射的雨水冲击力大,反溅面积大,会使湿闪电压降低。

③淋雨架到试品的距离,应能保证试验电压安全,不会产生间隙击穿。淋雨架高度,应能随着试品高度变化,以保证喷水高度。贮水箱的水压应能调节,以保证喷洒的距离。

(4)淋雨量的测量方法

淋雨量的测量包括测量部位的选定、接雨器具结构的选择、接雨时间的确定和淋雨率的计算。

测量淋雨量的部位,要根据试品外绝缘的垂直高度(或水平宽度)选定。当试品外绝缘的高度没有达到 1m 时,只设一个测量点,并把测量器放在试品外绝缘的中间部位;当试品外绝缘的高度是 1~3m 时,设 3 个测量点,分设在上、中、下三个部位;当试品外绝缘超过 3m 时,适当地增加测量点,均匀地分布在上、中、下部位。

接雨器应能同时接收试品垂直表面(垂直方向)和水平表面(水平方向)的淋雨。所以,接雨器应满足以下要求:

①接雨器要有两个相互垂直的开口。一个接垂直方向的淋雨,另一个接收水平方向的淋雨,并且两个开口要紧密相邻;

②接雨器要有两个贮水盒。一个存放垂直方向的淋雨,另一个存放水平方向的淋雨。并且,两个贮水盒不相通。两个贮水盒都有放水塞,以便把收集水放出,进行测量;

③接雨器的开口面积要有 $100\text{cm}^2\sim 750\text{cm}^2$, 贮水盒的深度要有 10cm~25cm (深度约为开口直径的 1/2)。贮水盒的结构要便于清洗,对收集起来的水不产生污染。

测量的雨量,要能代表试品表面的淋雨量。所以要把接雨器放在试品的附近,并要避免试品表面的雨水反溅到接雨器里。

在一个测量点的测量时间,应不少于 2min。并且,接雨器在测量时要水平移动位置。移动范围等于试品的宽度。

对各个测量点的雨量进行测量之后,应分别计算各点的垂直方向淋雨率和水平方向淋雨率,然后再计算垂直方向平均淋雨率和水平方向平均淋雨率。

计算测量点的淋雨率使用下式:

$$F_i = \frac{V_i}{S_i \cdot t_i} \quad (10-25)$$

式中 F_i ——一个测量点的垂直方向淋雨率或水平方向淋雨率,mm/min;

V_i ——一个测量点在测量时间 t_i 内所接收的垂直方向雨量或水平方向雨量,mm³;

t_i ——接雨时间,min;

S_i ——接雨器垂直开口面积或水平开口面积,mm²。

试品的垂直方向淋雨率或水平方向淋雨率用其各测量点的平均值表示,即:

$$F = \frac{\sum F_i}{n} \quad (10-26)$$

式中 n ——测量点的个数;

F ——试品淋雨率(垂直方向或水平方向),mm/min。

第五节 变压器外绝缘的检测

变压器外绝缘的检测,就是用检测外绝缘尺寸的方法判定外绝缘是否达到耐受电压的要求。变压器外绝缘检测依据的标准是:国标 GB10237—1988《电力变压器绝缘水平和绝缘试验——外绝缘的空气间隙》。在标准中只规定检测以下部位:

- (1)相对地和相对中性点的空气间隙;
- (2)相间的空气间隙;
- (3)高压绕组出线端对低压绕组出线端的空气间隙;
- (4)中性点出线端对地的空气间隙。

国标没有规定检测变压器套管的空气沿面绝缘,因为套管在出厂时已按国标 GB4104 进行了试验和检测,证明绝缘符合国标要求。

国标对不同电压等级的变压器规定了不同的标准间隙(尺寸)。当实际变压器的空气间隙(尺寸)达到国标要求时,可以不对它进行耐受电压试验。国标指出:“当过去的实际经验充分表明采用比本标准规定值还要小的空气间隙值仍能有足够的绝缘裕度时,显然就没有必要将比较小的间隙值加大”。即间隙尺寸虽小,但它的绝缘裕度已被证明可靠,也可以不加大尺寸,不对它进行高电压试验。但是,如果实际空气间隙较小,且没有运行(试验)经验证明其可靠时,则要对它进行耐受电压试验。耐受电压试验方法,按国标规定,有两种试验方法。试验方法如下。

第一种是雷电冲击全波电压试验方法,该方法适用于 $u_m < 300\text{kV}$ 电压等级的变压器。试验电压施加在被试相的线端,其他非试线端接地。试验电压采用正极性,试验电压幅值等于试品的耐受电压。试验方法采用“3+3”的加压方法,即首先对试品施加 3 次雷电冲击耐受电压,在 3 次试验中没有出现间隙击穿时,判定试品通过试验;在 3 次试验中出现 2 次间隙击穿时,判定试品没有通过试验;在 3 次试验中出现一次间隙击穿时,则对试品再施加 3 次试验电压。当后 3 次施加的试验电压都没有出现间隙击穿时,判定试品通过试验;当再出现 1 次间隙击穿时,判定试品没有通过试验。

第二种是操作波冲击电压试验方法,适用于 $u_m \geq 300\text{kV}$ 的变压器。试验电压施加于被试相的出线端,非试相的出线端要根据绕组连接方式决定悬空或接地。试验电压采用正极性,试验电压幅值等于试品耐受电压。试验方法,采用 15 次加压方法。当试品在试验时的间隙击穿次数没有超过

2 次时,判定试品试验合格,否则为不合格。

如果对实际变压器进行试验有困难,则可以用模型替代实际变压器进行试验。相对相模型试验时,一端施加正极性电压,另一端施加负极性电压,两者的电压幅值相等($u_+=u_-$),两者的电压幅值之和($u_++u_-=u$)等于耐受电压值。

国标规定的空气间隙(尺寸),由试品对应的耐受电压决定,并且有 5 种情况要区别对待。现分别加以说明。

(1)对 $u_m<300\text{kV}$ 电力变压器套管的带电部分对地及对其他带电体之间的空气间隙,其值是根据雷电冲击耐受电压和工频耐受电压确定的,推荐值见表 10-6。

(2)对 110~500kV 变压器中性点套管的带电部分对地的空气间隙,其值是根据雷电冲击耐受电压和工频耐受电压确定的,推荐值见表 10-7。

(3)对 $u_m\geq 300\text{kV}$ 电力变压器套管带电部分对地及对其他带电体之间的空气间隙,其值用雷电冲击耐受电压和工频耐受电压验证时,推荐值见表 10-8。

(4)对 $u_m\geq 300\text{kV}$ 电力变压器套管带电部分对地及对其他带电体之间的空气间隙,其值用操作波冲击电压验证时,推荐值见表 10-9。

(5)特殊情况,要根据图 10-8、图 10-9 和图 10-10 给出的关系,选择间隙尺寸,或选择耐受试验电压。

当实际变压器的空气间隙小于表 10-9 给出的数值时,要对被校核间隙进行操作冲击电压试

表 10-6 $u_m<300\text{kV}$ 电力变压器套管带电部分对地及对其他带电体之间的空气间隙推荐值

额定电压 (方均根值) /kV	设备最高电压 (方均根值)/kV	额定短时工频 耐受电压(方 均根值)/kV	额定雷电冲击 全波耐受电 (峰值)/kV	最小空气 间隙/mm
3	3.5	18	40	60
6	6.9	23	60	90
10	11.5	30	75	125
15	17.5	40	105	180
20	23	50	125	225
35	40.5	80	185	340
63	69	140	325	630
110	126	185	450	830
220	252	360 395	850 950	1600 1800

表 10-7 中性点套管带电部分的对地空气间隙推荐值

额定电压 (方均根值) /kV	设备最高电压 (方均根值) /kV	中性点的接地方式	中性点的额定雷电 冲击耐受电压(峰值) /kV	中性点的额定短时 工频耐受电压(峰值) /kV	最小空气间隙 /mm
110	126	—	250	95	450
220	252	直接接地	185	85	340
		不直接接地	400	200	760
330	363	直接接地	180	85	340
		不直接接地	550	230	1050
500	550	直接接地	180	85	340
		经小阻抗接地	325	140	630

表 10-8 $u_m\geq 300\text{kV}$ 电力变压器套管带电部分对地及其他带电体之间的空气间隙推荐值

额定电压 (方均根值)/kV	设备最高电压 (方均根值)/kV	额定短时工频耐受电压 (有效值)/kV	额定雷电冲击全波耐受电压 (峰值)/kV	最小空气间隙 /mm	
				相对地	相间
330	363	460 510	1050 1175	2300 2700	2650 3100

表 10-9 $u_m \geq 300\text{kV}$ 电力变压器套管带电部分对地及对其他带电体之间的空气间隙推荐值

额定电压 (方均根值)/kV	设备最高电压 (方均根值)/kV	额定相对地操作 冲击耐受电压 (峰值)/kV	额定时间操作 冲击耐受电压 (峰值)/kV	额定雷电 冲击全波 耐受电压 (峰值)/kV	最小空气间隙/mm		
					以操作冲击耐 受电压为基准 的相对地	以操作冲击耐 受电压为基准 的相间	以雷电冲击耐受 电压为基准的对 其他绕组线端
330	363	850	1300	1050	2300	2650	1950
		950	1425	1175	2700	3100	2200
500	550	1050	1675	1425	3100	3500	2650
		1175	1800	1550	3700	4200	2850

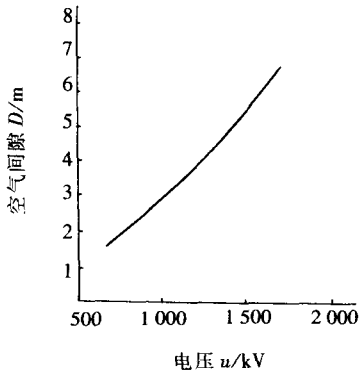


图 10-8 以额定操作冲击耐受电压值为基准的相对地空气间隙

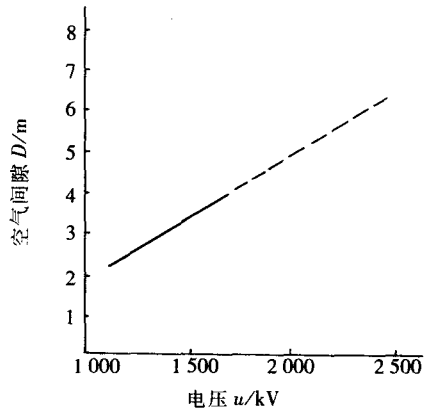


图 10-9 以相间出现的操作冲击电压为基准的相间空气间隙

验。试验电压值，根据表 10-8 规定的间隙尺寸，在图 10-8 或图 10-9 中选择其对应的耐受电压值。

对变压器绕组进行操作冲击电压试验时，绕组之间要产生电位差。该电位差的数值，按绕组的极性及匝数比进行计算。对应的间隙尺寸，按计算的电位差选择。当两个绕组出线端的电位极性相反，且幅值比不大于 2 时，按图 10-9 选择间隙尺寸；当幅值比大于 2 时，按图 10-8 选择间隙尺寸。

对变压器的高压绕组施加雷电冲击耐受电压时，实际间隙应按表 10-9 第 8 栏和图 10-10 对应尺寸进行校核。

对实际变压器进行操作冲击耐受电压试验时，在低压绕组会产生感应电压。因而在星型联结的低压绕组出线端之间也会出现高电压。所以，要按图 10-8 和图 10-9 选定间隙尺寸，并对它进行检测。

上述的表中数据和图中数据(间隙尺寸)都是和正常工作条件对应的。当实际变压器工作条件是高海拔($H > 1000\text{m}$)时，就要对表中给出的数据(或图中给出的数据)进行修正。修正方法，在国标 GB10237—1988 中给出，即海拔每升高 100m，间隙尺寸增大 1%。

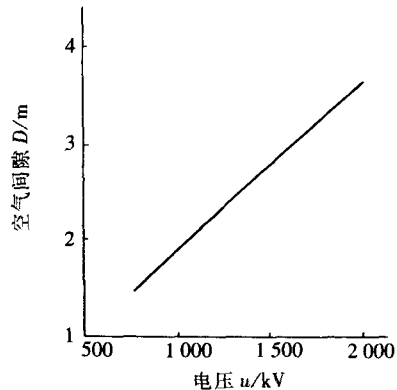


图 10-10 以雷电冲击电压为基准的空气间隙

第十一章 局部放电试验

第一节 概 述

随着电力系统电压等级的不断提高,电力变压器的电压等级和单台容量也在不断地提高。为了考核电力变压器承受工频、雷电和操作过电压的能力,国家标准规定了短时工频耐压试验、雷电冲击试验和操作冲击试验等绝缘试验项目。但是,由于这些绝缘试验与变压器长期工作电压对变压器的作用之间并没有固定的内在联系,特别是对于超高压电力变压器,长期工作电压对变压器的影响较各种过电压对变压器的影响更为严重和重要。为此,应采用一种可以考核变压器在长期工作电压作用下能安全可靠运行的绝缘试验方法,这就是局部放电试验。

对于任何一种绝缘结构,包括变压器的绝缘结构,内部存在气泡(气隙)、油隙和绝缘弱点都是不可避免的。这些气泡(气隙)、油隙和绝缘弱点通常是在变压器制造过程中形成的。如对于油浸式变压器,在其制造过程中,由于浸漆、干燥和真空处理不彻底,在产品所用的电木筒内、绝缘纸板内、绝缘纸层间等就不可避免地会形成一些空腔。当绝缘油不能完全浸入空腔时,空腔内就会存在一些气泡(气隙)。如果绝缘油本身质量有问题或绝缘油处理不好等,那么注入变压器中的绝缘油内部也会存在一些气泡。由于气体的介电系数比油、纸等绝缘材料的介电系数小,所以,气隙上承受的电场强度比油、纸绝缘上的电场强度高。当外施电压达到某一定值时,这些气隙就会首先发生局部放电。另外,油纸绝缘内的油膜,油隔板绝缘结构中的油隙,特别是“楔形”油隙,金属部件、导线等处的尖角、毛刺,电场集中、场强过高的局部区域等也都容易产生局部放电。

变压器绝缘结构中的局部放电,尤其是放电量较大的油纸绝缘表面产生的局部放电,将对变压器的绝缘造成破坏。其破坏情况有两种,一是由于放电质点对绝缘的直接轰击,造成局部绝缘的损坏,并逐步扩大,直至使整个绝缘放电击穿;二是由于局部放电产生的热、臭氧和氧化氮等活性气体的电化学反应,造成局部绝缘受到腐蚀,电导增加,最后导致绝缘热击穿。局部放电对绝缘的危害程度,一方面取决于局部放电的强度,如放电量大小、放电能量大小、放电次数等,另一方面还取决于绝缘的耐放电性能和局部放电作用下对绝缘的破坏机理。总之,局部放电对绝缘的危害,最终将导致变压器的绝缘寿命降低,并直接影响变压器在长期工作电压作用下的安全可靠运行。

变压器局部放电试验的目的:一是验证在标准规定的试验电压和时间内变压器的局部放电量是否符合标准和技术条件要求;二是当变压器局部放电量超过标准和技术条件规定时,通过对局部放电产生的原因进行分析和定位,然后加以排除;三是测量变压器的起始和终止放电电压,即施加电压上升时最初出现局部放电的最低放电电压和施加电压下降时最后消失局部放电的最高放电电压。

变压器局部放电的试验方法可分为电气法和非电气法两大类。电气法中有脉冲电流法、介质损耗法和电磁辐射法。非电气法中有声波法、测光法、测热法和物理化学法。电气法的灵敏度较非电气法高,所以,一般多采用电气法。在电气法中采用最多的是脉冲电流法。在非电气法中,常采用声波(超声波)法,尤其是声波法多用来对局部放电源进行定位。本文只对电气法中的脉冲电流法进行论述。

第二节 绝缘内部的气隙放电

1 产生气隙的原因及部位

(1) 由于变压器油净化不纯, 处理不好, 或静放时间不够, 从而造成油中含有少量的气泡(气隙)。

(2) 由于绝缘件的制造和产品制造工艺不完善, 从而造成层压木板、层压纸板中, 角环、静电板弯曲处, 线匝之间, 以及绝缘搭接缝隙等处存在一些气隙。

(3) 由于油浸变压器在真空处理和真空注油时真空度和真空时间不够, 从而造成油中、油纸绝缘中等处残存一些气泡(气隙)。

(4) 由于树脂绝缘干式变压器在真空浇注时, 真空度和真空时间不够, 从而造成树脂绝缘中残存一些气泡(气隙)。

(5) 由于树脂绝缘(绕包绝缘)干式变压器树脂与玻璃纤维等固化后形成的复合绝缘的热膨胀系数与铜导线(铜箔)、铝导线(铝箔)的热膨胀系数存在差异, 从而造成应力龟裂处(树脂层间)等存在一些气隙。

2 气隙放电的等效电路

变压器绝缘内部存在气隙的等效电路如图11-1所示。

假设在工频电压作用下, 试品 C_a 两端的电压上升到 U_s 时, 绝缘内部的气隙 C_c 发生放电, 放电过程的等效电路如图11-2所示。

假设气隙放电时气隙两端的引燃电压为 u_s , 则 $u_s = \frac{C_b}{C_b + C_c} U_s$ 。当气隙放电终止时, 气隙两端电压将下降到熄灭电压 u_r 。在此放电过程中, 气隙两端的电压变化为 $\Delta u_c = u_s - u_r$, 这个变化使试品两端的电压降低, 即 C_a 向 C_b 和 C_c 补充电荷(因在此瞬间电源还来不及向试品充电)。

3 气隙放电时两端的电压变化

由图11-2可知, $u_c = r i_r = r(i_b + i_c) = r \left(-C_c \frac{du_c}{dt} - \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \frac{du_c}{dt} \right) = -r C_p \frac{du_c}{dt}$, 气隙放电由起始到终止时间 t 内的变化为:

$$-\frac{1}{r C_p} \int_0^t dt = \int_{u_r}^{u_s} \frac{1}{u_c} du_c, \text{ 由此可解得:}$$

$$u_r = u_s e^{-\frac{1}{\tau}}$$

(11-1)

式中 τ ——气隙的放电时间常数, $\tau = r C_p$;

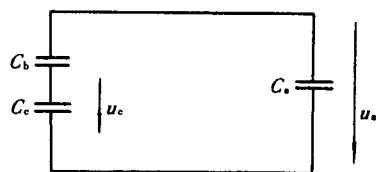


图11-1 气隙等效电路

C_a —完好绝缘介质的等效电容 C_b —与气隙串联的绝缘介质的等效电容 C_c —气隙的等效电容
 u_s —绝缘介质两端电压 u_c —气隙两端电压

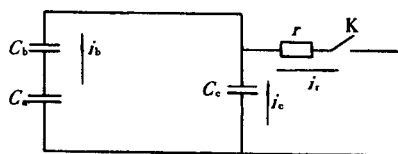


图11-2 气隙放电过程的等效电路

r —放电弧道等效电阻 K —放电瞬间等效开关 i_b —气隙放电后流过 C_b 的等效电流 i_c —气隙放电后流过 C_c 的等效电流 i_r —气隙放电(弧道)电流

C_p ——放电回路的等效电容, $C_p = C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}$ 。

气隙两端的电压变化为:

$$\Delta u_c = u_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (11-2)$$

试品两端的电压变化为:

$$\Delta u_a = \frac{C_b}{C_a + C_b} \Delta u_c = \frac{C_b}{C_a + C_b} u_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (11-3)$$

Δu_a 的等效放电波形如图11-3所示。

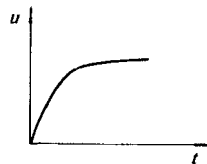


图11-3 Δu_a 的等效放电波形

由式(11-3)和图11-3波形可知,气隙在放电过程中反映在试品两端的电压变化并不是一个理想的直角波,而是一个有一定上升时间(一般气隙放电时间在 $0.01 \sim 0.1 \mu s$,油隙放电和沿面放电的放电时间可达 $2 \sim 3 \mu s$ 或更长)的指数脉冲波。一般气隙放电时间按 $0.1 \mu s$ 来选择变压器局部放电试验回路校正用的方波发生器的方波陡度。这是因为,一方面,在变压器结构合理、制造工艺完善的情况下,变压器内部大量出现的局部放电多为气隙放电;另一方面,按不同的放电类型和放电时间来选择方波发生器的陡度是非常困难的,甚至是不可能的。

4 视在放电电荷与真实放电电荷的关系

气隙放电时产生的脉冲电流 i_r 为:

$$i_r = \frac{u_s}{r} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11-4)$$

在气隙放电时间 t 内中和的电荷 q 为:

$$q = \int_0^t i_r dt = \frac{u_s}{r} \int_0^t e^{-\frac{t}{\tau}} dt = C_p u_s (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = C_p \Delta u_c = (C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b}) \Delta u_c \quad (11-5)$$

在气隙放电瞬间 C_a 向 C_b 和 C_c 补充的电荷 Q_a 为:

$$Q_a = C_a \Delta u_a = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \Delta u_c \quad (11-6)$$

由式(11-5)、式(11-6)两式可计算出 Q_a 为:

$$Q_a = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \cdot \frac{C_a + C_b}{C_c (C_a + C_b) + C_a C_b} \cdot q = \frac{C_a C_b}{C_c (C_a + C_b) + C_a C_b} \cdot q$$

因为 $C_b \ll C_a$,

$$\text{所以 } Q_a \approx \frac{C_b}{C_b + C_c} \cdot q \quad (11-7)$$

在气隙放电过程中,因试品两端电压变化而引起的电荷变化为:

$$Q_x = C_x \cdot \Delta u_a = C_x \cdot \frac{C_b}{C_a + C_b} \Delta u_c = (C_a + \frac{C_a C_b}{C_b + C_c}) \cdot \frac{C_b}{C_a + C_b} \cdot \frac{q}{(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b})} = \frac{C_b}{C_b + C_c} q \quad (11-8)$$

比较式(11-7)和式(11-8)两式可知, $Q_x \approx Q_a$ 。 Q_x 称为视在放电电荷, q 为真实放电电荷。由于无法直接测量出 q , 所以, 只能用局部放电检测仪测量出来的 Q_x 来相对(间接)地反映试品局部放电量

荷的大小。

第三节 产生局部放电的其他原因

1 结构方面的原因

由于变压器绝缘结构不合理,从而造成绝缘内部电场分布不均匀。若某些部位的电场强度低于绝缘介质的起始放电电压水平,则这些部位就容易发生局部放电。

2 材料方面的原因

(1)铜、铝导线,铜、铝箔表面不光滑、有毛刺,该毛刺不仅会造成局部放电,而且还会损坏匝间绝缘,造成匝间绝缘短路。

(2)绝缘纸板、绝缘纸等绝缘材料表面不光滑,内部有杂质,严重的含有金属粉尘等都容易引起局部放电。

(3)变压器油中含有水、纤维等杂质,这些杂质可引起油中电场畸变,使局部场强升高,从而引起局部放电。

3 加工制造工艺方面的原因

以下几种加工制造工艺方面的问题均可引起局部放电。

(1)金属部件,如油箱、夹件等加工制造过程中存在尖角、毛刺,磁屏蔽接地不良,或存在某些其他局部缺陷等。

(2)绝缘件,如纸板筒、油隔板、围屏、角环、垫块、撑条等在加工制造过程中上面粘有铁屑、铜屑和其他杂质,或存在尖角、毛刺等。

(3)绕组内部导线、引线焊接部位处理不光滑,有尖角、毛刺,绕组出头处屏蔽不牢固、不圆滑等。

(4)在器身装配和总装配过程中,由于围挡不好、检查不细,造成器身上和油箱内存在一些焊粒或其他金属异物等。

(5)由于工艺不完善造成角环、静电板的弯曲处,引线和绕组接头处的油纸绝缘中以及绕组端部绝缘中等存在一些油隙。

(6)由于工作环境,如车间降尘量、清洁度等达不到要求,而使产品清洁度较差,或混进一些杂质、异物等。

综合以上分析可知,除绝缘内部存在的各种各样的气隙可产生局部放电外,产品的结构、材料和制造工艺等方面存在的一些问题和绝缘缺陷都会产生局部放电。尤其是制造工艺方面,不仅涉及到每个部件,而且还涉及到每道工序和每个操作人员。因此,为了避免制造工艺方面出现上述绝缘缺陷,除应不断完善工艺和严格工艺纪律外,还应加强每个操作人员的工作责任心,提高每个操作人员的技术水平,做到在产品制造过程中精雕细刻、一丝不苟。只有这样才能保证产品具有较低的局部放电量。

第四节 局部放电试验的基本测试回路

1 测试阻抗的特性及选择

测试阻抗的种类可分为电阻(R)型,电感(L)型,阻容(RC)型,电感、电容(LC)型和电阻、电感、电容(RLC)型。

对于R型测试阻抗,由于电阻的频率特性不随外界频率的改变而变化,所以,R型阻抗防止各种频率干扰的能力较差,采用这种测试阻抗的试验回路通常要配置低通滤波器。对于L型测试阻抗,

由于L型阻抗可以起到良好的滤波作用,所以,可以省去低通滤波器。对于RC型测试阻抗,由于C在高频下容抗很小,所以,RC型阻抗对防止外界高频干扰的能力较强,但测试灵敏度较R型阻抗为低,且同样需配置低通滤波器。对于LC型测试阻抗,既有防止外界高频干扰的能力,又可省去低通滤波器。对于RLC型测试阻抗则可同时具备RC和LC型测试阻抗的特性。

由于变压器的绝缘结构比较复杂,其绕组又是一个具有对地电容和纵向电容、电感的分布参数电路(见图11-4)。所以,当变压器绕组或绝缘内部某点发生局部放电时,其脉冲电压在绕组内的传播特性是极其复杂的,且在传播过程中还会产生衰减、高频振荡或多次反射。反映到测试阻抗上的脉冲电压波形将随局部放电产生的部位和测试阻抗的型式不同而存在较大的差异。为了使测试阻抗的特性尽量符合局部放电脉冲电压在绕组内的传播特性,根据以上对各种型式测试阻抗的特性分析,我们认为变压器局部放电试验宜选择RLC型测试阻抗。

2 基本测试回路

局部放电的基本测试回路通常分为直接测试回路和桥式(平衡)测试回路两大类。直接测试回路又分为并联测试回路和串联测试回路两种。

如果试品与地无法分开,或者试品等效电容 C_x 较大,或者试品有可能被击穿,为了避免过大的工频电流流入测试阻抗,则应采用并联测试回路,如图11-5所示。

如果试品等效电容 C_x 较小,为了提高测试回路的灵敏度(灵敏度随耦合电容器 C_k 与 C_x 比值的增大而提高),则应采用串联测试回路,如图11-6所示。

当外界干扰比较严重时,采用桥式(平衡)如图11-7所示的测试回路,可以消除某一频率的外界干扰对测试回路(测试仪器)的影响。但桥式回路并不能消除所有频率的外界干扰,尤其是对于宽频带放大器的局部放电检测仪。因为电桥的平衡条件与频率有关,所以只有当桥臂电容 C_x 和 C_k (C_x')的电容量和介质损耗率完全相等时(实际上,试验中很难找到两个电容量和介质损耗率完全相等的 C_x 和 C_x'),电桥才能完全平衡,才能消除掉各种频率的干扰。如果两个 C_x 和 C_x' 的电容量和介质损耗率不相等,则电桥只能在某一固定频率下平衡,即此时只能消除掉某一种频率的干扰。

3 测试仪器

3.1 放大器的特性及选择

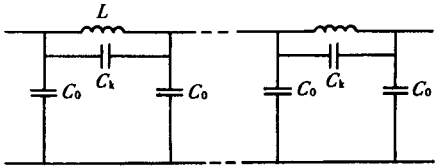


图11-4 变压器绕组等效电路

L —绕组电感 C_k —绕组匝(段)间电容
 C_o —绕组对地电容

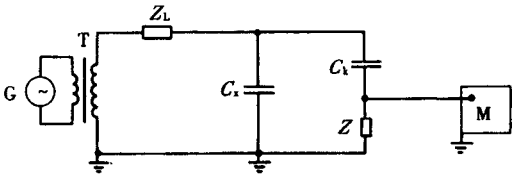


图11-5 并联测试回路

G—100~200Hz发电机 T—中间变压器 Z_L —高压滤波阻抗
 C_x —被试变压器等效电容 C_k —耦合电容器 Z—测试阻抗 M—局部放电检测仪

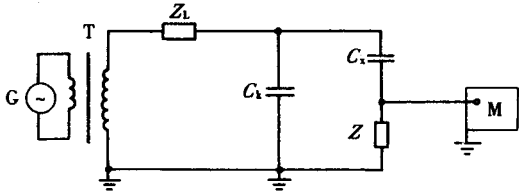


图11-6 串联测试回路

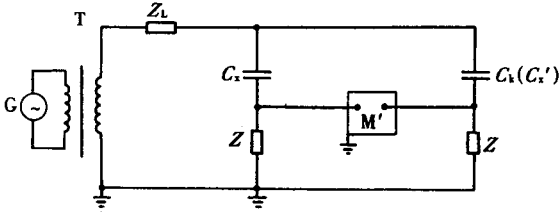


图11-7 桥式测试回路

C_x' 、 C_k —电容量、介质损耗率近似相同的试品
M'—桥式局部放电检测仪

局部放电检测仪常用的放大器有宽频率带放大器（宽频带局部放电测量仪）和窄频带放大器（窄频带局部放电测量仪）。

宽频带局放仪的频带宽度一般为100kHz~400kHz,特性为对所测脉冲波形不发生畸变,能测试脉冲电压和视在放电量等值,并能区分脉冲波形和极性。但由于频带较宽,易受外部干扰,因此应在有良好屏蔽的环境下使用。

窄频带局放仪的频带宽度为9kHz~30kHz,中心频率 f_0 为50kHz~1MHz。该放大器的特性是它所测量的脉冲波形容易发生畸变,能测试脉冲电压和视在放电量等值,但不能区分脉冲波形和极性,抗外部干扰的能力比宽频带放大器强。

另外还有一种中频带放大器(中频带测量系统),其频带宽度一般为90kHz,最大可达180kHz,中心频率为400kHz。该放大器的特性是:它所测波形的畸变程度较窄频带放大器为好;能测脉冲电压和视在放电量等;可克服窄频带放大器不能区分脉冲波形和极性的缺点;抗外部干扰的能力较宽频带放大器好,但较窄频带放大器差。

在实际使用时可根据不同的试品、不同的要求和外部干扰的情况选择不同的测量放大器(测量系统)和不同的测量频率范围。对于变压器,应采用宽频带局放仪,其测量频率范围最大可为10kHz~1 000kHz。

3.2 局部放电检测仪的种类及选择

目前使用较多的局部放电检测仪,国产的有JF8001、JF8601型等;进口的有英国的Model-5型、瑞士的9120(9121~9128)型、PD-1MOD型和PD-SPDA型。JF8001的性能基本上与Model-5相同。JF8601具有较强的抗干扰判别功能和数字显示功能。9122~9125型具有桥式检测功能,其中9125型具有数字显示功能。PD-SPDA型为数字式局放分析系统。

上述局部放电检测仪均可以满足对一般产品的局部放电测量要求,但对于干扰较严重的试验场所或电力系统的在线检测,则应采用具备抗干扰判别功能的局部放电检测仪和平衡测试回路为好。另外,当用局部放电检测仪对电力系统中的变压器进行局部放电在线检测时,还应同时采用超声波检测,以便由电、声信号的时延大小来进一步鉴别所测信号是局部放电还是外界干扰。

第五节 油浸电力变压器的局部放电试验

1 试验标准及规定

局部放电试验依据的标准是GB7354—2003和GB1094.3—2003。GB7354—2003《局部放电测量》标准的制订等同采用了标准IEC66270:2000《局部放电测量》。

原GB1094.3—1985《电力变压器 第三部分 绝缘水平和绝缘试验》标准的制订参照采用了标准IEC76—3(1980)《电力变压器 第三部分 绝缘水平和绝缘试验》。在该标准中规定了若电力变压器的最高电压 $U_m \geq 252$ kV,则带有局部放电测量的感应耐压试验属于例行试验,且当测量电压为 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 时,最大允许放电量不大于500pC;测量电压为 $1.3U_m/\sqrt{3}$ (此电压由制造厂和使用部门在签订合同时商定)时,最大允许放电量不大于300pC。试验时的加压程序如图11-8所示。

按照 IEC60076—3:2000 和 国家标准

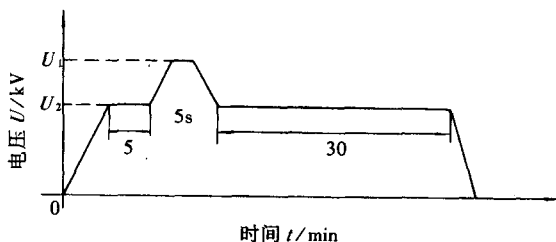


图11-8 GB1094.3—1985标准加压程序

$$U_1 = U_m (\sqrt{3} \cdot U_m / \sqrt{3}) \text{ kV} \quad U_2 = 1.5 U_m / \sqrt{3} \text{ kV}$$

GB1094.3—2003《电力变压器 第三部分 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙》的规定：

(1) 对于 $U_m>72.5\text{kV}$ 和 $U_m=72.5\text{kV}$ 、 $10\,000\text{kVA}$ 及以上的变压器，不论高压绕组为全绝缘还是分级绝缘，均应进行局部放电试验。

对于全绝缘三相变压器只进行相间局部放电试验；对于分级绝缘三相变压器应进行相对地和相间局部放电试验。

(2) 试验的种类有两种：第一种是短时感应耐压试验带局部放电测量(ACSD)，其加压试验程序见图11-9；第二种是长时感应电压试验带局部放电测量(ACLD)，其加压试验程序见图11-10。

图中 U_1 为额定短时感应耐受电压，对于ACSD试验， U_1 为相间试验电压；对于ACLD试验， U_1 为相对地试验电压， $U_1=1.7U_m/\sqrt{3}\text{V}$ 。

U_2 为局部放电测量电压，对于ACSD试验，全绝缘变压器相间 $U_2=1.3U_m$ ；分级绝缘变压器相间 $U_2=1.3U_m$ （对于 $U_m=550\text{kV}$ 的变压器，相间 U_2 应降为 $1.2U_m$ ），相对地 $U_2=1.5U_m/\sqrt{3}$ 。对于ACLD试验，分级绝缘变压器相对地 $U_2=1.5U_m/\sqrt{3}$ 。

U_1 、 U_2 试验电压标准值见表11-1。

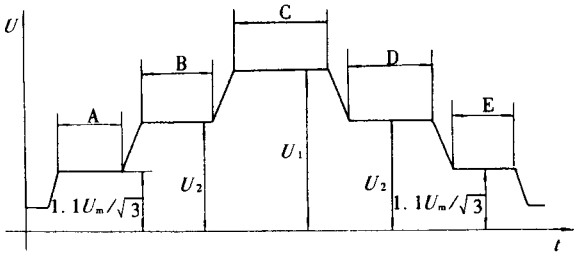


图11-9 ACSD加压试验程序

A、B、D、E段时间 $t=5\text{min}$ C段时间 $t=120\times\frac{f_N}{f},\text{s}$
 f_N —额定频率,Hz f —试验频率,Hz

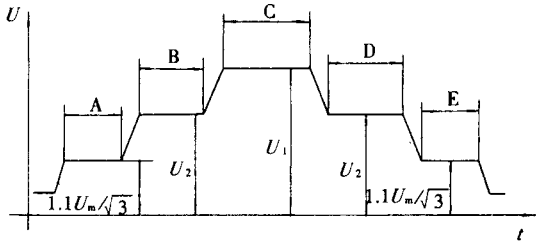


图11-10 ACLD加压试验程序

A、B、E段时间 $t=5\text{min}$ C段时间同图11-9
D段时间 $t=60\text{min}(U_m\geq 300\text{kV})$ 或 $30\text{min}(U_m<300\text{kV})$

表11-1 局部放电试验电压(方均根值)

kV

系统标称电压	设备最高电压 U_m	ACSD 试验			ACLD 试验	
		相间 U_1	相间 U_2	相对地 U_2	相对地 U_1	相对地 U_2
66	72.5	132	94	54	71	63
110	126	200	164	95/109	124	109
220	252	360	328	218	247	218
		395	328	218	247	218
330	363	460	472	315	356	314
		510	472	315	356	314
500	550	630	660	476	540	476
		680	660	476	540	476

注：66kV级和110kV级斜线上的95kV为全绝缘变压器相间试验时的相对地电压。

(3) 试验的型式有例行试验和特殊试验：

①对于 $U_m=72.5\text{kV}$ 、 $10\,000\text{kVA}$ 及以上和 $72.5\text{kV}<U_m\leq 170\text{kV}$ 的变压器，第一种试验为例行试验；第二种试验为特殊试验。

②.对于 $170\text{kV}<U_m<300\text{kV}$ 和 $U_m\geq 300\text{kV}$ 的变压器，第二种试验为例行试验；第一种试验为特殊试验。

(4)允许放电量的规定:

在测量电压为 $1.5U_m/\sqrt{3}$ kV相对地试验电压下,最大允许放电量不超过500pC;

在测量电压为 $1.3U_m/\sqrt{3}$ kV相对地试验电压下和 $1.3U_m$ kV相间试验电压下,最大允许放电量不超过300pC;

在测量电压为 $1.1U_m/\sqrt{3}$ kV相对地试验电压下,最大允许放电量不超过100pC。

根据用户要求,经与制造厂协商同意,允许的局部放电量也可不按上述标准规定。

2 试验线路

2.1 单相变压器试验线路

单相变压器试验线路如图11-11所示。

2.2 三相变压器试验线路

对于全绝缘变压器应采用三相电源试验(试验线路从略)。对于分级绝缘变压器一般均采用单相电源试验,但根据高压绕组的不同联结方式,也可采用三相电源试验。以下试验线路均为单相电源试验线路。

2.2.1 单端测量

典型试验线路(以YNd11联结组为例)如图11-12所示(标准中图3长时感应电压试验线路Y联结)。

对于三相三铁心柱变压器,当按图11-12(a)试验线路进行试验时,由于A、B相磁通分布的不对称(如图11-13所示),所以,当C相(或A相)感应出的电压为 U 时,A、B两相(或B、C两相)感应出的电压不都等于 $\frac{1}{2}U$ (严重时可能出现B相为 $\frac{3}{4}U$,A相或C相为 $\frac{1}{4}U$)。显然,此时B、C相(或A、B相)的相

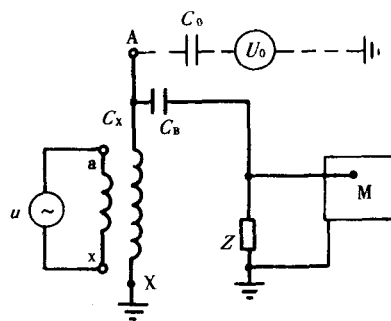


图11-11 IIO联结组试验线路

u —100~200Hz试验电源(包括发电机、中间变压器)
 C_x —被试变压器 C_b —被试相套管电容(代替耦合电容器 C_k) Z —测试阻抗 M —局部放电检测仪
 U_0, C_0 —方波校准系统(加压试验时去掉,下同)

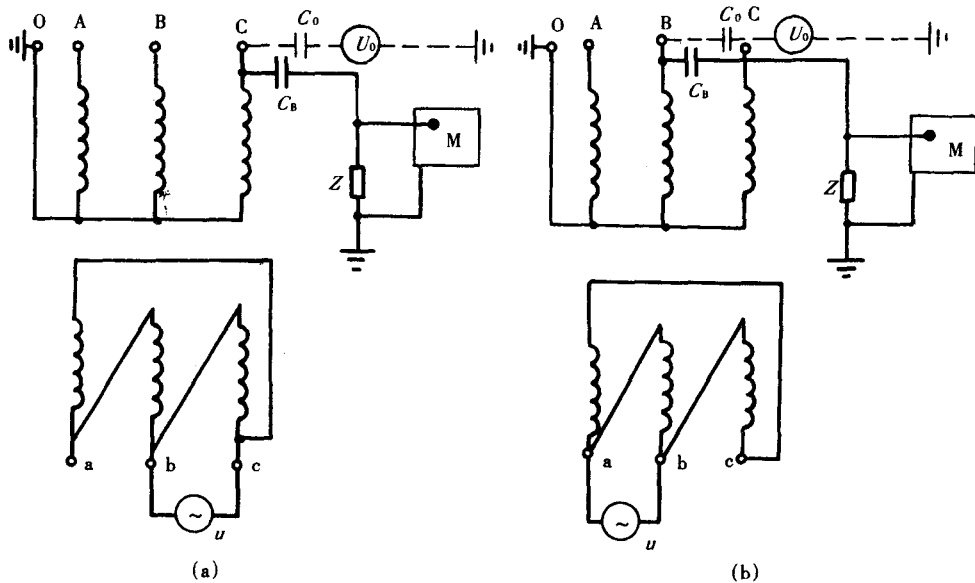


图11-12 YNd11联结组试验线路

(a)C相试验线路 (b)B相试验线路

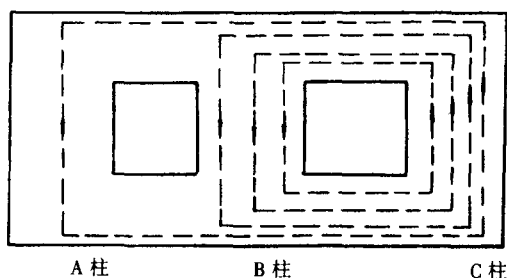


图11-13 BC相励磁时各铁心柱磁通分布

间感应电压将超过了 $1.5U$ 。试验证明,变压器的电压等级越高,采用图11-12(a)试验线路试验时的相间感应电压就越高,如果变压器相间绝缘裕度较小,则对上述问题应予以注意。

为了解决按图11-12(a)试验线路试验所产生的相间感应电压超过 $1.5U$ 的问题,可采用图11-14所示的试验线路。

由于A、B相(或B、C相)短路,所以,使A、B相(或B、C相)铁心中的磁通分布均等于 $\frac{1}{2}\Phi$,感应出的电压也均等于 $\frac{1}{2}U$,故A、B相(或B、C相)的相间感应电压也均等于 $1.5U$ 。采用此线路试验时,应保证在试验电压下连接A、B相(或B、C相)的导线是无晕的。

对于三相三绕组变压器,局部放电试验可采用图11-15所示的试验线路。图中(虚线)为将中压绕组 A_m 、 B_m (或 B_m 、 C_m)短路,其作用与将高压A、B(或B、C)短路是相同的。但由于中压绕组电压较低,所以连接 A_m 、 B_m (或 B_m 、 C_m)的导线直径可大为减小,且连接也比较容易。

以上叙述的图11-12、图11-14、图11-15试验线路仅表示的是三相变压器几种典型的局部放电试验线路。根据不同的试验要求和不同的变压器结构,还可以采用其他不同于上述的试验线路,如采用中性点支撑(见标准中图2短时感应电压试验线路 a_1 、 a_2 、 a_3)、中压绕组支撑等试验线路。

2.2.2 多端测量

由于变压器内部任何一个放电源所产生的放电脉冲都会向变压器的所有能在外部接线测量的成对端子传递信号,并引起每个引出端子与地之间电压的瞬时变化。所以,如果将某一校准脉冲波(亦称方波)向各校准端子对注入时,其他端子也可以得到相应的响应值(电荷量)。利用这一原理,我们

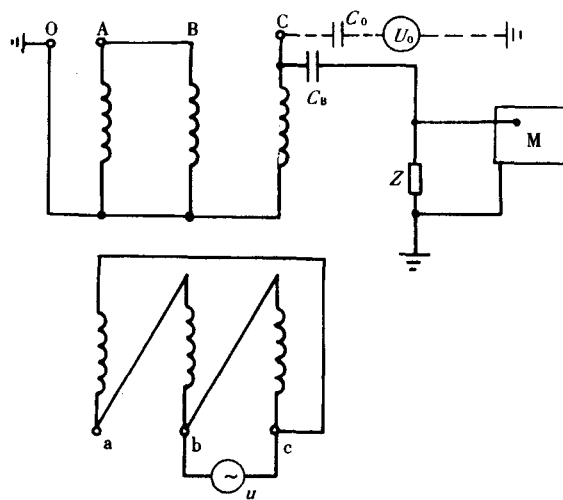


图11-14 A、B(或B、C)短接试验线路

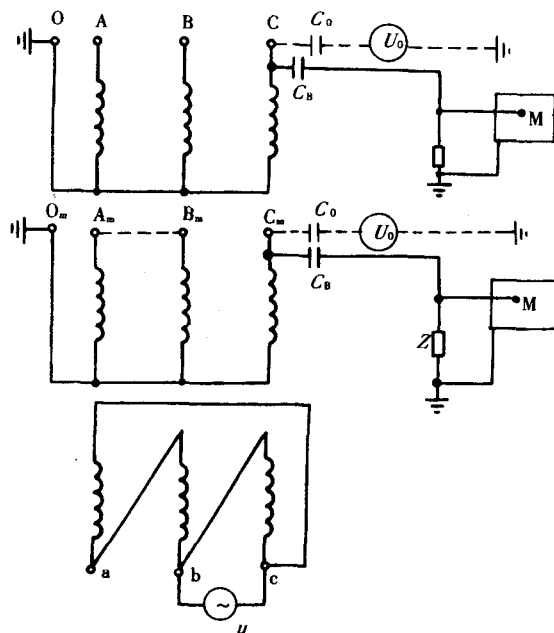


图11-15 YNyn0d11联结组试验线路

可以采用多端校正和多端测量的方法（该方法亦可作为辅助定位）对三相变压器的局部放电进行测量，即首先将方波校准系统接入一对规定的校准端子上，如图11-16中的1.1对地、2.1对地等，观察并记录所有测量端子上的响应值。然后再对其他各成对的校准端子逐一重复上述校准程序。这样所有成对的校准端子的组合就形成了表11-2所示的校正矩阵（3.1端为低压首端）。

当加压试验时，测量并记录各测量端子的试验电压和局部放电量，该试验电压和局部放电量的组合也形成了表11-2所示的测量矩阵。如果某一试验电压和某一测量端子上测得的局部放电量与上述向某一个特定的成对端子注入方波脉冲时在某一端子测得的响应值明显相似时，则可认为实际局部放电源与该对校准端子密切相关。如表11-2中在 $U=1.5U_m/\sqrt{3}$ 电压下，2.1端测得的局部放电量与2.1端对地校准时2.1端测得的电荷量相近，从而可认为2.1端子上出现了约1500pC的局部放电量，其位置或许在串联绕组与公共绕组之间连线上的某一位置，也可能在邻近绕组的端部。多端校准、多端测量方法的原理和详细介绍见GB1094.3—2003标准附录A的A5款。

3 方波校准线路和方法

校准包括两种：一种是局部放电检测仪本身的特性校准，如模拟指示仪表的刻度校准等；第二种校准是整体试验回路和局部放电检测仪的例行校准（试验前的校准）。本文论述的方波校准系统的校准指第二种校准。

方波校准系统校准的目的：一是确定整体试验回路和局部放电检测仪的刻度因数，即测量局部放电量的标尺；二是校验试验回路和局部放电检测仪是否能够测量有关设备标准规定的最大允许放电量。方波校准线路如图11-11、图11-12、图11-14和图11-15中的虚线部分所示。

方波校准应在试验前（必要时试验后再进行一次复校）试品不带电的情况下进行，校准时应分别在试品测量端（A、B、C）和接地端注入方波脉冲，该脉冲等价于一大小为 q 的放电量， $q=U_0 \cdot C_0$ 。然后调节局部放电检测仪的增益旋钮，使其指示仪表的指示值等于 q ，并记下 q 值和增益旋钮的位置（挡位）。为保证方波校准有效和准确，应注意以下几个问题：

（1）方波的陡度应 $\leq 0.1\mu s$ ，方波电压 U_0 通常为2~50V。

（2）应合理选择耦合电容 C_0 值，选择原则为： $10pF < C_0 \leq 0.1C_x(pF)$ 。对于油浸电力变压器的方波校准， C_0 可取50pF~100pF。

（3）校准时方波发生器（或 C_0 ）应尽量靠近试品的测量端，且 C_0 到测量端的连线要尽量短。

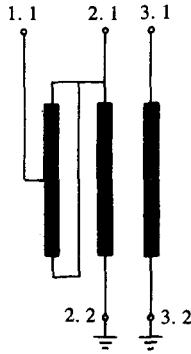


图11-16 一台自耦变压器多端校准多端测量实例

表11-2 多端校准多端测量（见图11-16）结果矩阵

通道校准	1.1	2.1	2.2	3.1
	任意单位			
1.1-地 2000pC	50	20	5	10
2.1-地 2000pC	5	50	30	8
2.2-地 2000pC	2	10	350	4
3.1-地 2000pC	3	2	35	25
试验				
$U=0$	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
$U=U_m/\sqrt{3}$	<0.5	<0.5	0.5	0.5
$U=1.5U_m/\sqrt{3}$	6	40	25	8

4 试验方法

4.1 起始(终止)放电电压的测量

在试验电压上升至 U_2 和由 U_2 下降过程中分别测量起始放电电压和终止(熄灭)放电电压。试验时,施加到试品上的电压由最低值(零值)开始,均匀缓慢地上升到出现局部放电时为止,记录此时的起始放电电压和放电量;将电压再升高10%试验电压左右,然后均匀缓慢地将电压下降到局部放电熄灭时为止,记录此时的终止放电电压。按照上述试验方法重复试验三次,并取平均值,即为试品的起始和终止放电电压。

4.2 规定电压下的局部放电量测量

按照有关标准规定的加压程序进行加压试验,并对标准规定的进行局部放电测量的所有绕组逐相进行测量。试验时,在 U_2 电压的第一阶段应记录实测的局部放电量;应观测 U_1 电压下的局部放电量;在 U_2 电压的第二阶段应连续观察并按每隔5min的时间间隔记录实测的局部放电量;应观测并记录 $U_3(1.1U_m/\sqrt{3} \text{ kV})$ 电压下的局部放电量。实测局部放电量可由局部放电检测仪直读。当局部放电量较大时,应增大增益旋钮,此时,局部放电检测仪直读值应乘以增益旋钮的增大倍率。

局部放电试验合格与否的判定原则是如果在 U_2 电压第二阶段和 U_2 电压下测量的连续局部放电量不大于标准规定的最大允许放电量,且在整个试验时间内局部放电量没有表现出明显地、不断地向接近最大允许放电量方向增长的趋势,则判定试品局部放电试验合格;如果在 U_2 电压第二阶段一段时间内测量的局部放电量超过标准规定的最大允许放电量,之后又低于最大允许放电量,则试验应不间断地继续进行,直到在此后的标准规定的试验时间内实测的局部放电量不超过标准规定的最大允许放电量,且没有出现明显地、不断地向接近最大允许放电量方向增长的趋势,此时,仍可判定试品局部放电试验合格;如果在 U_2 第二阶段试验时间内实测的局部放电量超过标准规定的最大允许放电量,则判定试品局部放电试验不合格。此时,应按GB1094.3—2003标准附录A规定的程序和方法对被试品进行探查、定位及分析。

4.3 试验中的注意事项

(1)试区内的金属物体应可靠接地,且不能与试验用胶皮电缆的火线接触,否则将产生数千皮库的局部放电量。如对某220kV变压器进行局部放电试验时,在 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 电压下,由上述原因引起的局部放电量可达2000pC左右。

(2)测量端使用的金属屏蔽罩、屏蔽环与测量端接线端子连接要牢固,且不要与套管瓷裙相碰,否则也将产生局部放电。如对某220kV变压器进行局部放电试验时,在 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 电压下,由于前者原因产生的局部放电量可达数千皮库,由于后者原因产生的局部放电量也可达1000pC左右。

(3)试验用中间变压器(发电机)、高压导线、屏蔽罩、屏蔽环等在试验电压下不应发生电晕放电,它们在试验电压下的最大场强应 $\leq 1.5 \text{ MV/m}$ 。

(4)试验时的背景噪声水平应不大于100pC。

(5)试验结束(去掉电压)后,应对测量回路和局部放电检测仪再进行一次方波校准,以验证其是否与试验前校准的刻度因数相同,避免由于局部放电检测仪或其他环节出现未知的故障而使测试结果有误。

5 典型局部放电的种类及波形

5.1 气隙(气泡)局部放电

这种局部放电主要发生在绝缘纸板、纸筒、纸等固体绝缘和变压器油中的气隙(气泡)中。由于气隙周围的绝缘介质不同,其局部放电的波形也不相同,如图11-17所示。

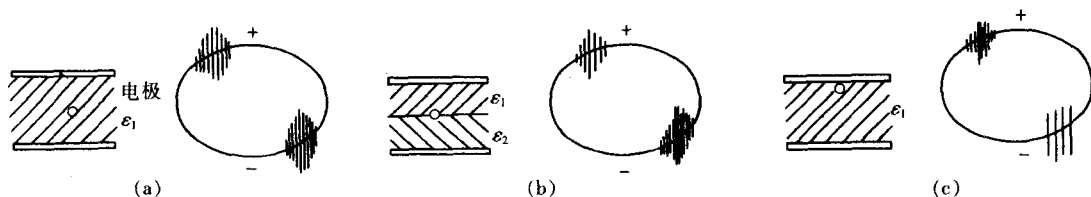


图11-17 气隙局部放电波形

(a)气隙周围绝缘介质相同时的气隙局部放电 (b)气隙周围绝缘介质不同的气隙局部放电
(c)气隙一侧为金属、一侧为绝缘介质时的气隙局部放电

5.2 固体绝缘局部放电

这种局部放电主要发生在绝缘介质内部、绝缘介质边界表面和绝缘介质与金属部件之间。其典型局部放电波形如图11-18所示。

5.3 绝缘导体和金属部件尖端局部放电

这种局部放电主要发生在绝缘导体尖端(如导线表面的尖角、毛刺,导线、引线焊接处的尖角、毛刺等)和金属部件尖端(如油箱、夹件等处的尖角等)。其典型局部放电波形如图11-19所示。

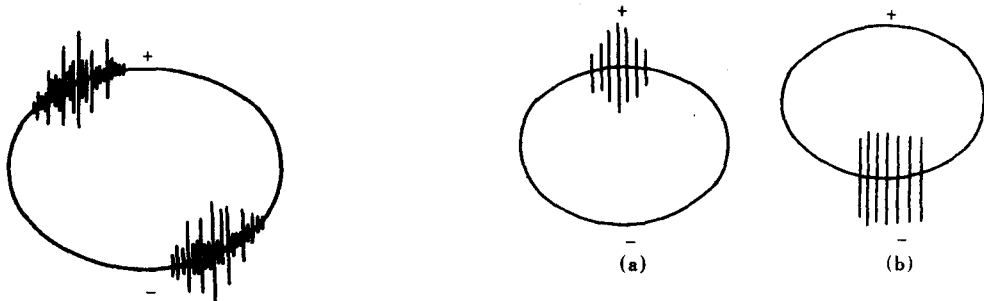


图11-18 固体绝缘局部放电波形

图11-19 绝缘导体(金属部件)尖端局部放电波形

(a)尖端在高压部分 (b)尖端在接地部分

第六节 干式电力变压器的局部放电试验

1 试验标准及规定

局部放电试验依据的标准为GB6450—86《干式电力变压器》，该标准等效采用国际标准IEC 726(1982)《干式电力变压器》。按照上述标准规定,干式电力变压器的局部放电试验是特殊试验(实际上均按例行试验实施)。按照GB/T10228—1997《干式电力变压器技术参数和要求》(该标准1998年5月1日实施)规定,对于包封绕组并采用树脂浇注的干式电力变压器,局部放电试验是例行试验(IEC60076—11:2004标准规定,除所有干式电力变压器均进行例行试验外,对于接到中性点绝缘系统或接到中性点是通过高阻抗接地系统中的干式电力变压器,还应附加特殊局放试验。试验程序如图11-21)。干式电力变压器的最大允许放电量按照JB/T56009—1998《干式电力变压器质量分等》标准规定,对于非包封绕组:合格品不大于40pC;一等品不大于30pC;优等品不大于10pC。对于包封绕组:6kV、10kV电压等级:合格品不大于30pC;一等品不大于10pC;优等品不大于5pC。35kV电压等级:合格品不大于50pC;一等品不大于20pC;优等品不大于10pC。IEC60076—11:2004标准规定 $\leq 10\text{pC}$ 。如果按照企业的产品技术条件和用户要求,局部放电量可能更小。此种情况下,产品局

部放电量的大小要由制造厂和用户协商确定。

试验时电压的施加方式:单相变压器采用单相电源,三相变压器应采用三相电源。

试验程序按标准5.10.4.1项(三相变压器)和5.10.4.2项(单相变压器)。对于三相变压器,如果其绕组接到直接接地或通过一个小阻抗接地的系统时,应采用5.10.4.1项程序a,加压程序如图11-20所示。

如果变压器绕组接到不接地或通过一个相当大的阻抗(如消弧线圈)接地的系统时,应采用5.10.4.1项程序b,加压程序如图11-21所示(按IEC60076—11:2004标准规定,例行试验: $U_1=1.8U_N$, $U_2=1.3U_N$ 。特殊试验: $U_1=1.3U_N$, $U_2=U_N$)。

2 试验线路

2.1 单相变压器

单相变压器试验线路同图11-11,但图中 C_b 应用无局部放电的耦合电容器 C_k 代替。

2.2 三相变压器

(1) 绕组接到中点接地系统时按程序a试验,试验线路如图11-22所示。

(2) 绕组接到中点绝缘系统时按程序b试验,试验线路如图11-23所示。

3 方波校准线路及方法

方波校准线路如图11-22、图11-23中的虚线部分所示(A端虚线接地表示另一端子接地时的重复试验)。校准的方法同11.4.3项,但校准用的小耦合电容器 C_0 的取值可小一些,一般可取20pF~30pF。

4 试验方法

4.1 规定程序下的局部放电电量测量

当采用试验程序a时,非测量端子不需接地。此时,A、B、C各端相对地试验电压分别为 $1.5U_m/\sqrt{3}$ kV(预加电压)和 $1.1U_m/\sqrt{3}$ kV(测量电压);相间试验电压分别为 $1.5U_m$ kV和 $1.1U_m$ kV。当采用试验程序b时(对于我国35kV及以下的电力系统,干式电力变压器的局部放电试验均应选择程序b),非测量端子应分别接地一次,即测量A相局部放电电量时,B、C相分别接地一次;测量B相局部放电电量时,A、C相分别接地一次;测量C相局部放电电量时,A、B相分别接地一次(IEC60076—11:2004标准规定,例行试验时不需接地)。此时,

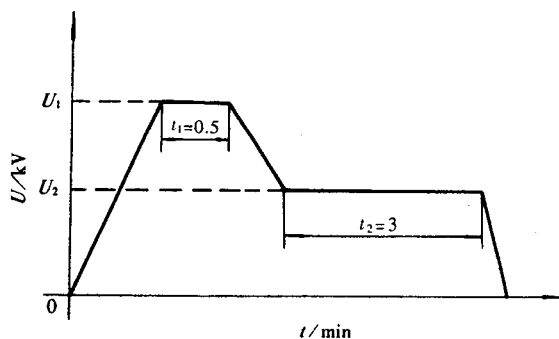


图11-20 加压程序a

$U_1=1.5U_m/\sqrt{3}$ 相对地预加电压, kV

$U_2=1.1U_m/\sqrt{3}$ 相对地测量电压, kV

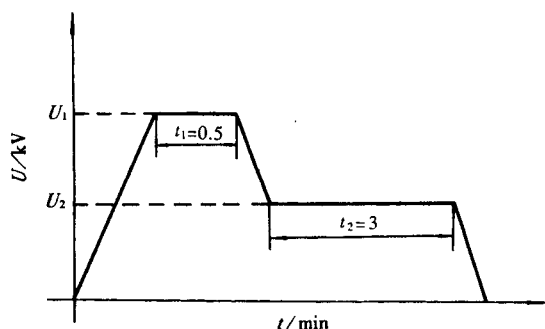


图11-21 加压程序b

$U_1=1.5U_m$ 相对相预加电压, kV

$U_2=1.1U_m$ 相对相测量电压, kV

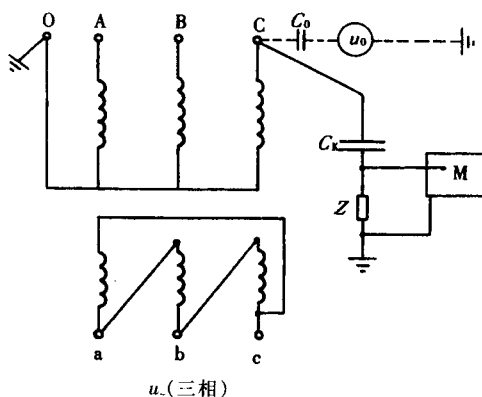


图11-22 程序a试验线路(YNd11联结组)

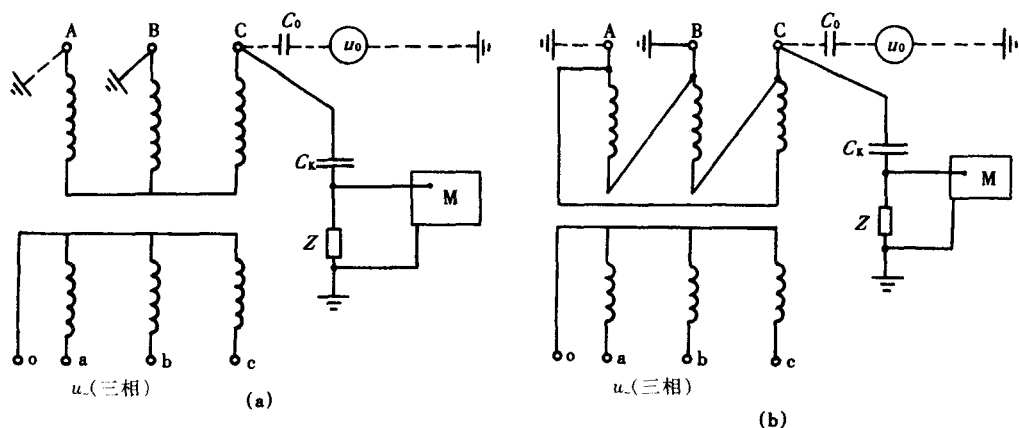


图 11-23 程序b试验线路
(a)Yyn0联结组 (b)Dyn11联结组

A、B、C各端相对地和相间试验电压分别为 $1.5U_m$ kV(预加电压)和 $1.1U_m$ kV(测量电压)。

可由局部放电检测仪测量 U_2 电压下的局部放电量,且应测量记录3min时间内的局部放电量。

测量结果的判定包括两个方面:一方面是实测局部放电量的判定,对于单相干式电力变压器和按程序a试验的三相干式电力变压器,实测局部放电量可由局部放电检测仪直读;对于按程序b试验的三相干式电力变压器,实测局部放电量应是局部放电检测仪两次直读值中的较大者。另一方面是局部放电试验的合格判定,一是在 U_2 电压和规定试验时间内实测局部放电量不大于技术条件或标准规定值;二是在 U_2 电压和规定试验时间内局部放电量没有明显不断地向接近最大允许局部放电量方向增长的趋势。如果在 U_2 电压和规定试验时间内实测局部放电量不符合上述合格判定原则,则判定局部放电试验不合格。此时应按GB1094.3—2003标准附录A规定的程序对局部放电试验不合格的原因进行研究解决。

4.2 试验中的注意事项

(1)试验用中间变压器(发电机)、高压侧引线(包括到耦合电容器的引线)等在试验电压下不应发生电晕放电。

(2)测量用耦合电容器在试验电压下不应发生局部放电(即耦合电容器是无晕的)。

(3)试验时局部放电检测仪的背景噪声应小于试品允许局部放电量的 $\frac{1}{2}$ 。

(4)遵循油浸电力变压器局部放电试验中的有关注意事项。

5 单相电源试验方法分析

由于企业受试验条件、试验设备所限,或者企业试验人员对标准的理解有误,对于按照程序b试验的三相干式电力变压器,有部分企业采用单相电源的试验方法,这是不符合GB6450—86标准(以下简称标准)要求的,因为采用该种试验方法,高压相对地、相间等试验电压达不到三相电源试验时所要求的标准值。为了说明上述问题,这里将对单相电源试验方法进行一些简单的分析。

5.1 Yyn0联结组变压器

先分析Yyn0联结组的变压器。当采用单相电源试验方法时,试验线路如图11-24所示。

试验时加压程序同图11-20,先施加 $1.5U_m/\sqrt{3}$ kV相对地预加电压,持续30s,然后降至 $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$ kV

相对地测量电压,持续3min。此时A端相对地和A、B相间的感应电压(试验电压)相同,且分别

等于 $\frac{1.5U_m}{\sqrt{3}} + \frac{0.75U_m}{\sqrt{3}} = \frac{2.25U_m}{\sqrt{3}}$ kV (预加电压)和

$\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}} + \frac{0.55U_m}{\sqrt{3}} = \frac{1.65U_m}{\sqrt{3}}$ kV(测量电压)。根据标

准规定,三相电源试验时A、B、C端相对地和相间试验电压应相等,且应分别等于 $1.5U_m$ kV(预

加电压)和 $1.1U_m$ kV(测量电压)。显然单相电源试验时的预加电压和测量电压均不符合标准要求,仅

为标准规定的三相电源试验时的 $\frac{1.5}{\sqrt{3}} \approx 0.866$ 。

如果要使A(B、C)端相对地和相间试验电压达到三相电源试验时的标准要求,应将低压励磁电压 $U_{oa(ob,oc)}$ 提高 $\frac{\sqrt{3}}{1.5}$ 倍,此时相对地和相间预加电压和测量电压均分别达到 $1.5U_m$ kV和 $1.1U_m$ kV。但

两种情况下的中性点X、Y、Z对地试验电压均不能满足三相电源试验时的标准要求。单相电源试验和三相电源试验时各部分试验电压的比较见表11-3。

表11-3 单相、三相电源试验各部分试验电压比较

试验线路	电源	励磁电压	相对地电压	相间电压	中性点(X、Y、Z)对地电压
图11-23(a)	三相	$1.5u_m$	$1.5U_m$	$1.5U_m$	$\frac{1.5U_m}{\sqrt{3}}$
		$1.1u_m$	$1.1U_m$	$1.1U_m$	$\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$
图11-24	单相	$\frac{1.5u_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{2.25U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{2.25U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{0.75U_m}{\sqrt{3}}$
		$\frac{1.1u_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1.65U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1.65U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{0.55U_m}{\sqrt{3}}$
图11-24	单相	u_m	$1.5U_m$	$1.5U_m$	$0.5U_m$
		$\frac{1.1}{1.5}u_m$	$1.1U_m$	$1.1U_m$	$\frac{0.55}{1.5}U_m$

5.2 Dyn11联结组变压器

对于Dyn11联结组的变压器,当采用单相电源试验时,试验线路如图11-25所示。

采用图11-25试验时,加压程序同图11-20。此时由于高压绕组为三角形联结,故高压A端相对地和A、B相间试验电压相等,且分别等于

$\frac{1.5U_m}{\sqrt{3}}$ kV(预加电压)和 $\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$ kV(测量电压)。可见,试验电压也不能满足三相电源试验时标准规定的

的 $1.5U_m$ kV(预加电压)和 $1.1U_m$ kV(测量电压)的要求,仅为三相电源试验时的 $1/\sqrt{3} \approx 0.577$ 。

如果要使A(B、C)端相对地和A、B(B、C、C、A)相间试验电压达到三相试验时的标准要求,应将低压励磁电压 $U_{oa(ob,oc)}$ 提高 $\sqrt{3}$ 倍,此时相对地和相间预加电压和测量电压方可分别达到 $1.5U_m$ kV

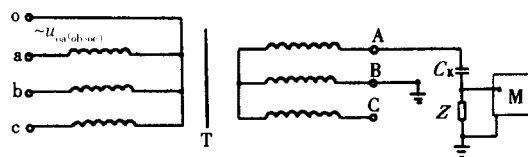


图11-24 Yyn0产品局部放电试验线路

u_{oa}, u_{ob}, u_{oc} —单相励磁电压

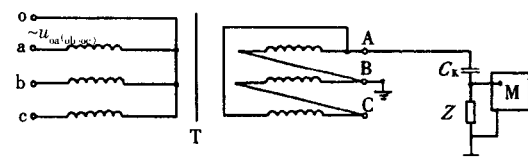


图11-25 Dyn11产品局部放电试验线路

和 $1.1U_m$ kV。单相电源试验和三相电源试验时各部分试验电压的比较见表11-4。

通过对5.1和5.2项分析可知,单相电源试验时,A、B、C端相对地和相间试验电压及Yyn0联结变压器的中性点X、Y、Z端对地试验电压均不能满足三相电源试验时的标准要求。而靠提高低压励磁电压虽然可使A、B、C端相

对地和相间试验电压满足三相电源试验时的标准要求,但对于Yyn0联结组的中性点X、Y、Z端对地试验电压仍然无法满足三相电源试验时的标准要求。另外,提高低压励磁电压又会对低压绕组的绝缘造成很大的危害。如对于Yyn0联结组的变压器,低压励磁电压(预加电压)最大已达 $\sqrt{3}$ 倍最大相电压;对于Dyn11联结组的变压器,低压励磁电压(预加电压)最大已达 $1.5 \times \sqrt{3} \approx 2.598$ 倍最大相电压。

由以上分析可知,由于单相电源试验方法存在上述问题,因此此种试验方法原则上是不适用的。

表11-4 单相、三相电源试验各部分试验电压比较

试验线路	电源	励磁电压	相对地电压	相间电压
图11-23(b)	三相	$1.5u_m$	$1.5U_m$	$1.5U_m$
		$1.1u_m$	$1.1U_m$	$1.1U_m$
图11-25	单相	$\frac{1.5u_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1.5U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1.5U_m}{\sqrt{3}}$
		$\frac{1.1u_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{1.1U_m}{\sqrt{3}}$
图11-25	单相	$1.5u_m$	$1.5U_m$	$1.5U_m$
		$1.1u_m$	$1.1U_m$	$1.1U_m$

第七节 局部放电试验中的干扰问题

1 干扰的来源

局部放电试验中的干扰主要有两大类,一类是与试验电压无关的干扰,这类干扰不随所施加的试验电压升高或降低而变化。这类干扰如无线电电磁波、电气开关开闭操作、电焊机起弧、吊车开动、整流机电刷、闪光灯等所产生的干扰。第二类是与试验电压有关的干扰。这类干扰一般随试验电压的增加而变大,如试验变压器低压电源和高压回路、高压引线电晕,试品端部接触不良,试区内金属物体接地不良,试区内绝缘物体与地线(或接地金属物体)接触等产生的干扰。尤其是试区内绝缘物体与地线(或接地金属物体)接触所产生的干扰,由于其放电特征与试品绝缘内部放电极相似,所以两者放电不易区分,容易造成误判断。各类干扰来源的示意图见图11-26。

本节仅对电源干扰和接地系统干扰进行一些简单的分析。

1.1 电源产生的干扰

当试验电源中的干扰电压 U_i 产生的干扰电流 i_i 进入试验变压器(中间变压器)的低压侧(ax)后,由于试验变压器(中间变压器)高、低压侧的电磁感应和电容(C_s)耦

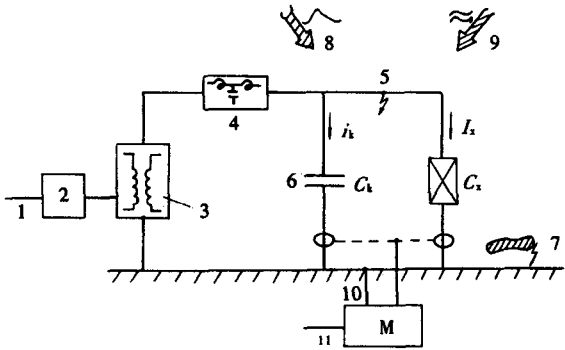


图11-26 各类干扰来源示意图

- 1, 11—电源干扰 2—调压器或发电机干扰 3, 4—试验变压器(中间变压器)和高压滤波器干扰 5—高压引线干扰 6—耦合电容器干扰 7—试区内金属物体等放电干扰 8—脉冲干扰 9—无线电电磁波(谐波)干扰 10—局部放电检测仪接地系统干扰

合,将产生干扰电流 i_2 。此干扰电流必将进入高压试验和测试回路,如图11-27所示。

1.2 地线产生的干扰

由于试验和测试回路是多点接地,且每两个接地点间均存在接地电阻 R ,所以,当地网中干扰电流 i_1 在地网中流过高压试验和测试回路中的任意两个接地点A、B时,就会在测试回路中产生干扰电流 i_2 (参见图11-28)。

2 典型干扰波形

2.1 与试验电压无关的干扰

2.1.1 无线电电磁波(谐波)干扰

波形特点为高频正弦振荡波,且沿整个椭圆均匀分布。其波形如图11-29所示。

2.1.2 电动机换向产生的干扰

波形特点为等幅值,且沿整个椭圆均匀分布。其波形如图11-30所示。

2.1.3 异步电机运行产生的干扰

波形特点为正、负半周对称出现,且波形呈逆时针旋转。其波形如图11-31所示。

2.2 与试验电压有关的干扰

2.2.1 高压端接触不良产生的干扰

该干扰特点为正、负半周对称出现,幅值相差不大。其波形如图11-32所示。

2.2.2 高压端电晕放电产生的干扰

该干扰特点为只在负半周出现,幅值相同,间距相等。试验电压增加时,根数增加,幅值不变。其波形如图11-19所示。

2.2.3 地面悬浮电位产生的干扰

该干扰特点为正、负半周对称出现,等幅、间距不变。其波形如图11-33所示。

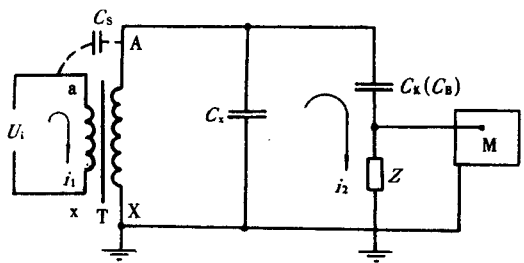


图11-27 试验电源侵入的干扰
 U_1 —电源干扰电压 i_1 —低压侧干扰电流 C_s —中间变压器
高、低压侧之间耦合电容 i_2 —测试回路干扰电流

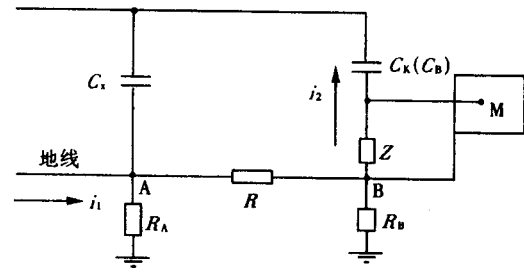


图11-28 地线侵入的干扰
 R_A, R_B —A、B两点的接地电阻 R —A、B两点之间的电阻
 i_1 —地线侵入的干扰电流 i_2 —测试回路干扰电流

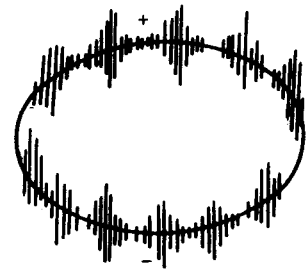


图11-29 无线电电磁波干扰

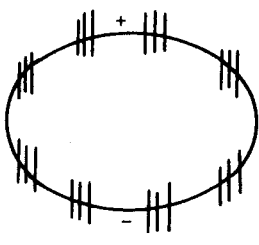


图11-30 电动机换向产生的干扰

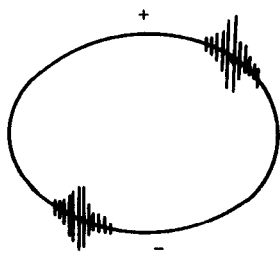


图11-31 异步电机运行产生的干扰

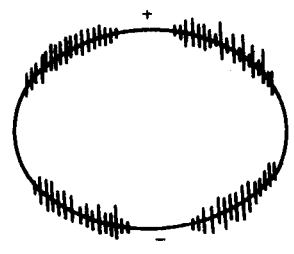


图11-32 高压端接触不良产生的干扰

3 消除干扰的措施

3.1 消除与试验电压无关的干扰

(1) 建立屏蔽室,其屏蔽效能一般在40dB~60dB,较好的可达70dB左右。实践证明,屏蔽室对防止和消除无线电电磁波等与试验电压无关的干扰是非常有效的。如某试验室内5.5m(长)×3.0m(宽)×2.8m(高)屏蔽室(1.5mm厚、单层钢板六面屏蔽)的屏蔽效能,经实测:对1.075MHz电台干扰(90dB~100dB)的屏蔽效能平均为50dB;对0.54MHz电台干扰(90dB~100dB)的屏蔽效能平均为40dB。根据实测,屏蔽室面积较大时,屏蔽效能较好。

(2) 积累各种不同干扰的波形特征,或每次加压试验前在示波屏上观察、记忆干扰波形,以作为鉴别或区分某些干扰的依据。

3.2 消除与试验电压有关的干扰

(1) 低压电源侧采用低通滤波器和双屏蔽隔离变压器。隔离滤波装置原理线路如图11-34所示。实践证明,采用上述措施不仅可以有效地消除试验电源侵入的干扰,而且也可以有效地消除地线(地电位)侵入的干扰。

(2) 高压试验回路采用高压滤波器,滤波器原理线路如图11-35所示。此种高压滤波器不仅可以有效消除低压试验电源经中间变压器电磁感应和电容耦合进入到高压试验和测试回路的干扰,而且也可以消除中间变压器和高压试验回路本身所产生的干扰。

(3) 将试区内金属物体可靠接地,并避免金属物体与绝缘物体接触,可有效地防止悬浮物体(悬浮电位)放电所产生的干扰。

(4) 采用的高压导线和连接线按防晕设计,即导线和连接的直径应足够大;以使其表面最大场强不大于1.5MV/m。场强计算可采用圆柱对平板电极的场强计算公式:

$$E_{\max} = \frac{9U}{10 \times r \ln \frac{r+d}{r}} \quad (11-9)$$

式中 E_{\max} ——最大场强, MV/m;

U ——局部放电试验电压, MV;

r ——防晕导线半径, m;

d ——防晕导线距地面的距离, m。

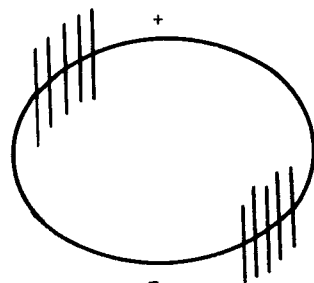


图11-33 悬浮电位放电

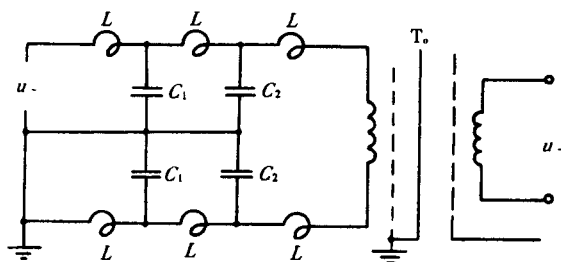


图11-34 低压隔离滤波装置原理线路

L —滤波电感(参考数据:2mH) C_1 —滤波电容(参考数据:2μF) C_2 —滤波电容(参考数据:4μF) T_0 —双屏蔽隔离变压器

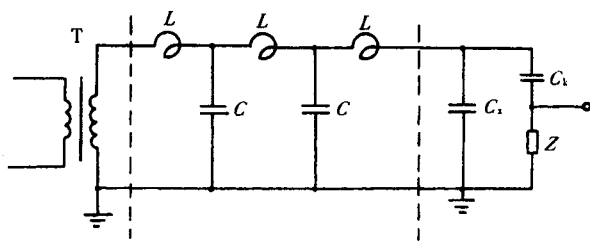


图11-35 高压滤波器原理线路

L —滤波电感(参考数据0.5H) C —滤波电容(参考数据:0.004μF)

(5)测量端加装无晕屏蔽罩或屏蔽双环。屏蔽罩一般设计成馒头形,其上部为半球形,下部为单环形。屏蔽双环由两个圆形单环组成。屏蔽罩、屏蔽双环的表面最大场强亦应不大于1.5MV/m。

屏蔽罩场强的计算可采用球对平板电极的场强计算公式:

$$E_{\max} = \frac{9U(r' + d')}{10 \times r' d'} \quad (11-10)$$

式中 r' ——球的半径,m;

d' ——球距地面的距离,m。

屏蔽双环的场强计算可采用圆环对平板电极的场强计算公式:

$$E_{\max} = \frac{U \left(1 + \frac{r''}{2R} \cdot \ln \frac{8R}{r''} \right)}{r'' \ln \frac{8R}{r''}} \quad (11-11)$$

式中 r'' ——单环小圆半径,m;

R ——双环中心线与单环小圆中心线的距离,m。

第十二章 雷电冲击试验

第一节 概 述

变压器在电力系统运行中要受到各种电压的作用,如持续工频电压、暂时过电压、操作过电压和雷电过电压等。为保证变压器在各种电压作用下安全运行,要用相应的试验对产品进行考核,雷电冲击试验就是为了考核变压器耐受雷电过电压的绝缘性能。

原 GB1094.3—1985 国家标准规定,雷电冲击全波和截波试验是变压器的型式试验项目,而对 220kV120MVA 及以上变压器,全波为例行试验项目。IEC60076—3:2000 和 GB1094.3—2003 标准规定,电压等级小于等于 72.5kV 变压器的雷电冲击全波、截波试验为型式试验;大于 72.5kV 变压器的线端全波为例行试验,线端截波和中性点全波为型式试验,可见新国标更为严格。因此对变压器来说,雷电冲击全、截波试验是重要的试验项目,其试验目的是用来检验变压器每一线端对地、对其他绕组以及被试绕组本身的冲击电压耐受强度。

关于变压器雷电冲击试验的技术要求和试验方法,有关国标已有明确规定,这些标准主要是 GB/T 16927—1997《高电压试验技术》、GB1094.3—2003《电力变压器》、GB7449—1987《电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则》。本书中未涉及的一些问题请读者参阅有关标准。

第二节 冲击电压发生器

1 雷电冲击电压波形

在运行的电力系统中,出现的大气过电压会有各种各样的波形,但不能用多种波形进行试验。根据系统的运行情况,世界各国都把全波和截波作为模拟雷电冲击的标准波形。当雷电波进入变电站而没有外绝缘放电时,电压即为全波,而当变电站空气绝缘间隙或设备的外绝缘等发生放电时,即为截波。

全波是有一定极性的非周期性脉冲电压波,见图 12-1,电压从零值很快上升到峰值,然后缓慢下降到零,从零到峰值时间 T_M 称波头时间,而电压降低到峰值 50% 时,此时间 T_2 称波长时间。这种非周期性冲击波可用式(12-1)双指数函数表示,波形见图 12-2。

$$U(t) = A(e^{-P_1 t} - e^{-P_2 t}) \quad (12-1)$$

在实际的冲击电压示波图中,起始点及峰值点不易确定。因此标准规定采用视在波前时间 T_1 和视在半波峰值时间 T_2 ,见图 12-3。在波前电压为 30% 和 90% 的 A、B 两点连线与 t 轴交点 O_1 为视在起点,若 AB 点间时间为 T ,则波前时间为 $T_1 = 1.67T$,视在

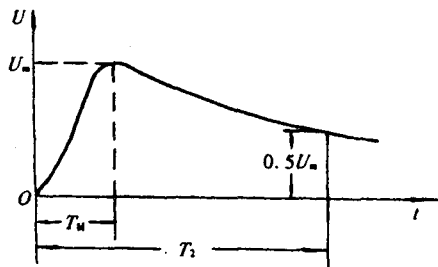


图 12-1 冲击电压全波

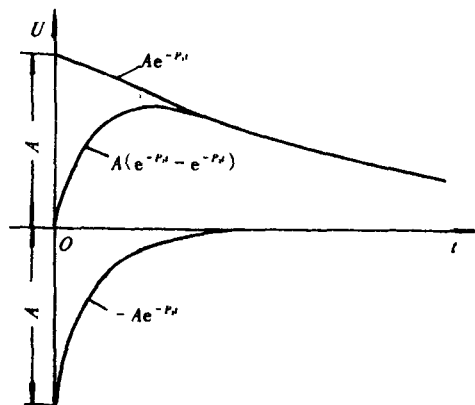


图 12-2 双指数冲击电压波

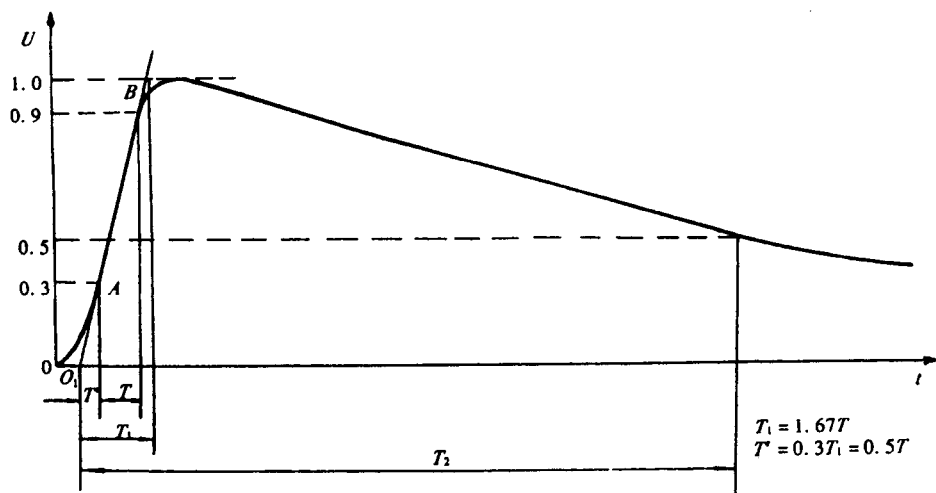


图 12-3 标准雷电冲击全波

原点 O_1 至 50% 电压时间 T_2 为半峰值时间。

截波可在全波电压的波尾或波前处截断, 见图 12-4 和图 12-5。截波波形可用截断时间 T_c 、截断时刻 T_j 、截波峰值 U_c 、截断时刻电压 U_j 、过零系数 U_2/U_c 等参数来表征。截断时刻 T_j 时电压 U_j 的 70% 和 10% 处以 C 和 D 点来表示。截断后视在持续时间为 C 点和 D 点时间间隔的 1.67 倍。截波的电压过零系数 K 为 U_2/U_c 。

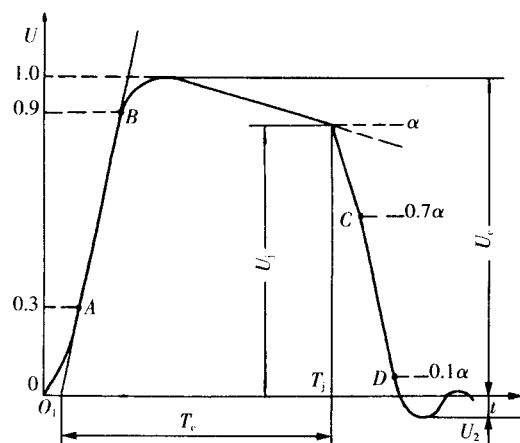


图 12-4 波尾截断的雷电冲击截波

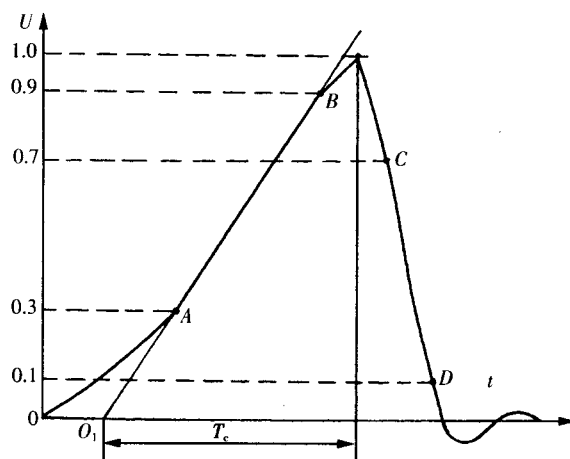


图 12-5 波前截断的雷电冲击截波

国家标准和 IEC 标准对雷电冲击全、截波波形参数规定见表 12-1。

由于试品电感的存在, 一般不能取得单极性标准全波电压, 在波尾部分有过零振荡, 此时要求振荡反峰值不超过施加电压幅值的 50%。

在大型电力变压器和电抗器的雷电冲击试验中, 由于绕组的等值电感小、等值电容大, 往往不可能得到规定的标准波形, 允许有更大的偏差。由于变压器冲击入口电容是一个常数, 大电容时为了得到符合要求的 T_1 , 只能减小波前的串联电阻, 但因设备本身及试验回路有一定的电感, 若串联阻尼电阻过小, 将使波前部分产生振荡或上冲, 而标准规定的振荡或上冲幅值不能大于峰值的 5%, 所以此电阻值不能过小, 从而决定了最小的视在波前时间 T_1 值, 此 T_1 可能大于规定值。为了兼

表 12-1 雷电冲击电压标准波形参数

波形	波形参数	标准值	
		GB	IEC
全波	波前时间 T_1	$1.2\mu\text{s}\pm 30\%$	
	半峰值时间 T_2	$50\mu\text{s}\pm 20\%$	
	峰值电压	波峰处振荡或上冲 $<\pm 5\%$, 电压值偏差 $<\pm 3\%$	
截波	截断时间 T_c	$2\sim 5\mu\text{s}, 2\sim 6\mu\text{s}$	
	过零系数 K	$0.25\sim 0.35$	<0.3

注:1. 中性点试验时,允许 $T_1<13\mu\text{s}$ 。

2. 标准 GB1094.3—2003 和 IEC 60076-3:2000 中规定截断时间为 $2\sim 6\mu\text{s}$ 。而 GB/T 16927.1—1997、GB7449—1987 和 IEC 60-1 规定为 $2\sim 5\mu\text{s}$ 。

顾振荡或过冲幅值和 T_1 值,试验导则中规定在振荡或过冲幅值不超过峰值 10%的前提下,尽量缩短 T_1 值。

关于试验电压值的决定,对于平滑的雷电冲击波,试验电压值为峰值。若冲击峰值处有振荡或过冲,如果振荡频率不小于 0.5MHz 或过冲的持续时间小于 $1\mu\text{s}$,则波形峰值为试验电压值。若冲击波前出现振荡,如认为此振荡很重要,应按有关标准规定确定波前振荡最大允许值。

2 冲击电压发生器线路

雷电冲击试验电压可用多级冲击电压发生器产生。冲击发生器的工作原理是多级电容器并联充电,然后串联放电,形成幅值很高的冲击电压,原理线路图见图 12-6。

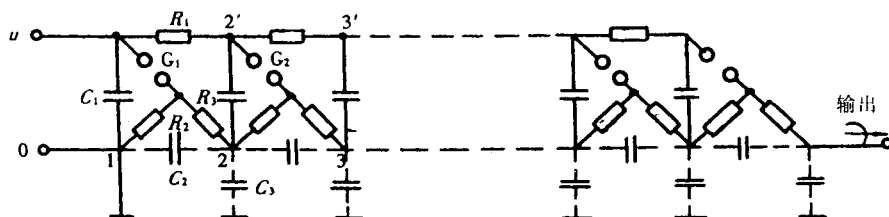


图 12-6 多级冲击电压发生器原理线路图

C_1 —每级冲击电容 C_2 —级间电容 C_3 —每级对地电容 R_1 —充电电阻

R_2 —放电电阻 R_3 —波前电阻 G_1 、 G_2 —球极

充电电压 u 通过充电电阻 R_1 加到各级电容器 C_1 的一端,而另一端通过 R_2 、 R_3 接到电源地端,此时 1、2、3 等各点均为零电位。而球隙 G_1 、 G_2 等均耐受电压 u 。当各级电容器充电到电压 u 后,使点火球 G_1 放电,此时点 2 电位将由零变为 u ,点 2' 电位由 u 变为 $2u$ 。由于 C_3 的存在,点 3 的电位仍为零。因此 G_2 的电压由 u 变为 $2u$,有一倍的过电压,使 G_2 放电。由此放电过程,其余各级球均相继放电,各级电容器通过间隙串联,使输出电压为 nu (n 为级数),加到试品端。实际上由于有 C_2 的存在。在放电过程中点 2、3 等接地各点均不能保持为零电位,因此各级球隙的过电压比上述数值为小,且级间电容 C_2 愈大则愈小。

实用上,对于高电压级次的冲击电压发生器,根据电容器等元件的不同情况及结构布置,会有不同的工作回路。图 12-7 为沈阳变压器有限责任公司 4 800kV 冲击发生器的回路及有关参数。发生器共 16 级,各级由两台 150kV 电容器串联,级电压 300kV,充电回路为半波倍压,高压变压器两端对地绝缘。

图 12-8 为沈阳变压器研究所 1 800kV 冲击发生器线路图,共 12 级,级电压 150kV,每级由两

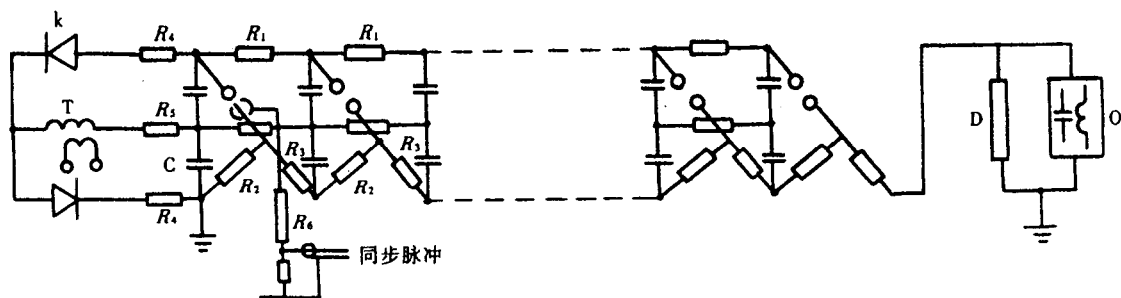


图 12-7 4 800kV 冲击发生器线路图

k—2DL300/0.1 高压硅堆 T—高压变压器 360V/115kV, 40kVA C—高压电容器 150kV, 0.9 μ F D—分压器
O—试品 R_1 —充电电阻 R_2 —放电电阻 R_3 —波前电阻 R_4, R_5 —保护电阻 R_6 —同步电阻

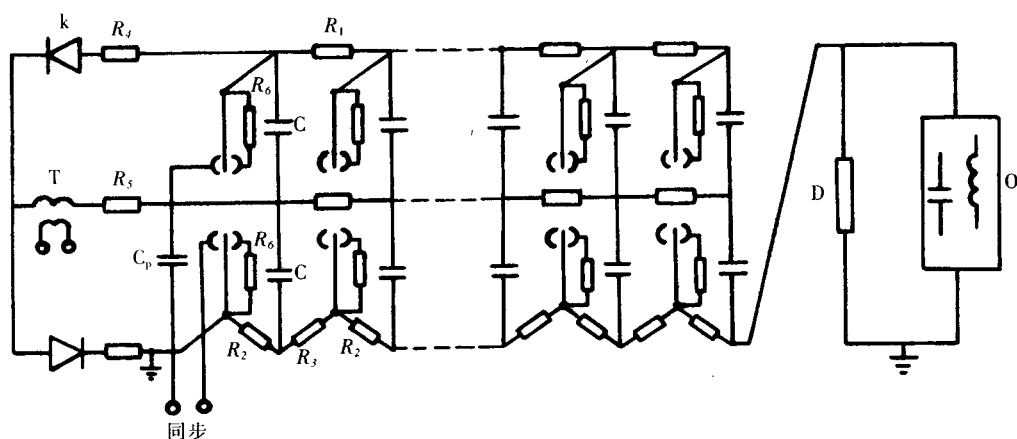


图 12-8 1 800kV 冲击发生器线路图

k—高压硅堆 T—高压变压器 C—高压电容器 C_p —耦合电容器 D—分压器 O—试品
 R_1 —充电电阻 R_2 —放电电阻 R_3 —波前电阻 R_4, R_5 —充电保护电阻 R_6 —箱位电阻

台 75kV、2 μ F 电容器串联组成, 冲击电容 0.083 3 μ F。能量 1 354J。每一球极均为三间隙。

发生器的等值放电回路见图 12-9(a), 其波前电阻 R_1, R_2 分别在放电电阻 R_3 的两侧, 当 R_2 为零时, 回路见图 12-9 (b), C_1 的放电电流流经 R_1 , 而 R_1 与 R_3 成分压, 因此 R_3 上的电压(亦即输出电压)将降低, 即所谓低效率回路。图 12-9(c)是 R_1 为零的回路, C_1 通过放电电阻 R_3 的放电电流不再产生 R_1 的压降, 而负荷电容 C_2 小, R_2 上电流小, 压降小, 使 C_2 上电压较高, 即为高效率放电回路。

3 阻容回路波形计算

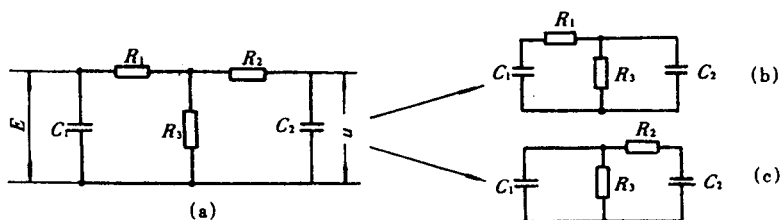


图 12-9 发生器高、低效率回路

C_1 —冲击电容 C_2 —负荷电容 R_1, R_2 —波前电阻 R_3 —放电电阻
 E —冲击电容电压 u —负荷电容电压

发生器放电回路中有电容器、电阻元件、内部及到试品的外部接线,这些元件中除电容、电阻外,尚有电感存在。为了建立波形与回路参数关系,指导波形调整,可不考虑寄生电感,简化为图12-9(a)的纯阻容回路计算波形。

C_1 冲击电容电压为 E 时,求得试品 C_2 上电压 u 为:

$$u = E \frac{P_1 P_2 R_3 C_1}{P_2 - P_1} (e^{-P_1 t} - e^{-P_2 t}) \quad (12-2)$$

$$P_{1,2} = \frac{(R_2 + R_3)C_2 + (R_1 + R_2)C_1}{2C_1 C_2 (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1)} \pm$$

$$\sqrt{\left[\frac{(R_2 + R_3)C_2 + (R_1 + R_3)C_1}{2C_1 C_2 (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1)} \right]^2 - \frac{1}{C_1 C_2 (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1)}} \quad (12-3)$$

由 $\frac{du}{dt} = 0$ 求得最大值时间 t_m 为:

$$t_m = \ln \frac{P_2}{P_1} / P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \quad (12-4)$$

将 t_m 代入式(12-2)求取最大值电压:

$$u_m = E \frac{P_1 P_2 R_3 C_1}{P_2 - P_1} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/(P_2/P_1 - 1)} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{P_2/P_1 (P_2/P_1 - 1)} \right] = E \frac{P_1 P_2 R_3 C_1}{P_2 - P_1} \xi_0 \quad (12-5)$$

$$\xi_0 = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/(P_2/P_1 - 1)} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{P_2/P_1 (P_2/P_1 - 1)} \quad (12-6)$$

若电压半值时间为 $t_{0.5}$, 则

$$\frac{1}{2} \xi_0 = e^{-P_1 t_{0.5}} - e^{-P_2 t_{0.5}} \quad (12-7)$$

实用上,因 $P_2 \gg P_1$, 可略去第二项,得:

$$P_1 t_{0.5} = -\ln \frac{1}{2} \xi_0 \quad (12-8)$$

效率为:

$$\eta = \frac{P_1 P_2 R_3 C_1}{P_2 - P_1} \xi_0 \quad (12-9)$$

短波与操作波的计算原理相同,但操作波用实际最大值时间 t_m , 而短波用定义波前时间 t_f , 由电压 0.9 及 0.3 的时间 $t_{0.9}$ 和 $t_{0.3}$ 来求取, 即

$$t_f = 1.67(t_{0.9} - t_{0.3}) \quad (12-10)$$

$$0.9 \xi_0 = e^{-P_1 t_{0.9}} - e^{-P_2 t_{0.9} \frac{P_2}{P_1}} \quad (12-11)$$

$$0.3 \xi_0 = e^{-P_1 t_{0.3}} - e^{-P_2 t_{0.3} \frac{P_2}{P_1}} \quad (12-12)$$

$$\frac{P_1 t_{0.9} - P_1 t_{0.3}}{0.6} = P_1 t_f \quad (12-13)$$

通过上述各式,对短波可分别求得 ξ_0 、 $P_1 t_f$ 、 $t_f/t_{0.5}$ 与 P_1/P_2 的关系。对操作波可求得 ξ_0 、 $P_1 t_m$ 、 $t_m/t_{0.5}$ 与 P_1/P_2 的关系。两种波形的各参数关系见图 12-10。一般雷电波 $t_f/t_{0.5}$ 变化范围不大,而操作波则较宽广。

由给定波形 $t_f/t_{0.5}$ 或 $t_m/t_{0.5}$, 可从图 12-10 找出 P_1/P_2 、 $P_1 t_f$ 、 ξ_0 (短波) 或 P_1/P_2 、 $P_1 t_m$ 、 ξ_0 (操作波), 进而算出 P_1 和 P_2 , 而 P_1/P_2 与回路参数有关, 例如对高效率回路 ($R_1=0$) 得:

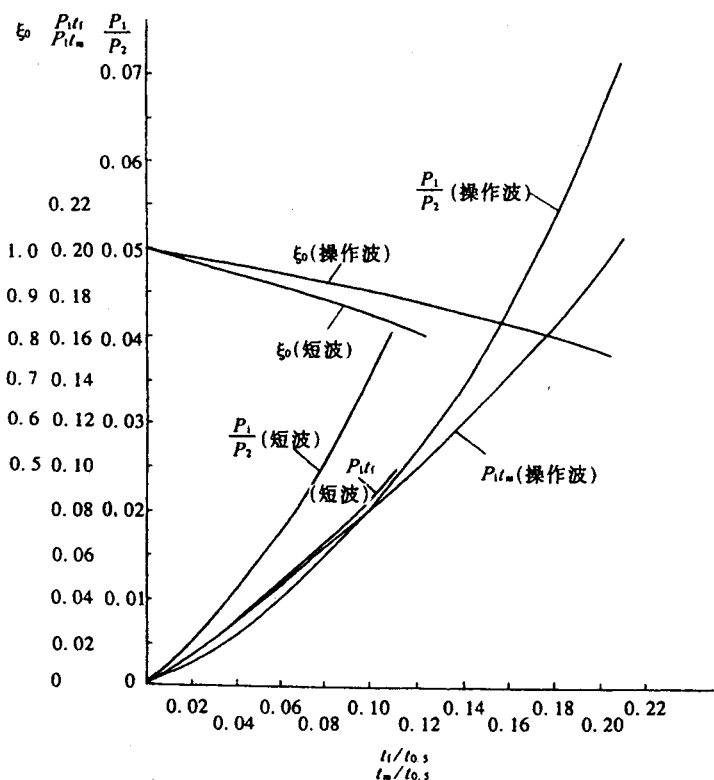


图 12-10 非周期波计算曲线

$$R_2 C_1 = Y \frac{(P_1 + P_2) - \sqrt{(P_1 + P_2)^2 - 4P_1 P_2 \left(\frac{1}{Y} + 1\right)}}{2P_1 P_2} \quad (12-14)$$

$$R_3 C_1 = \frac{2}{(P_1 + P_2) - \sqrt{(P_1 + P_2)^2 - 4P_1 P_2 \left(\frac{1}{Y} + 1\right)}} \quad (12-15)$$

对于 $R_2=0$ 的低效率回路:

$$R_1 C_1 = Y \frac{(P_1 + P_2) - \sqrt{(P_1 + P_2)^2 - 4P_1 P_2 (1 + Y)}}{2P_1 P_2} \quad (12-16)$$

$$R_3 C_1 = \frac{2Y}{(P_1 + P_2) - \sqrt{(P_1 + P_2)^2 - 4P_1 P_2 (1 + Y)}} \quad (12-17)$$

式中, $Y = C_1/C_2$, 当 Y 与 C_1 确定后, 即可算得高效率回路的 R_2, R_3 或低效率回路的 R_1, R_3 。

实用上, 若无特殊要求, 发生器均设计使用高效率回路, 试验中为便于调波, 高效率回路的波形可用下式简化估算:

$$t_f = 2.4 R_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (12-18)$$

$$t_{0.5} = 0.8 R_3 (C_1 + C_2) \quad (12-19)$$

若考虑回路有寄生电感(如下面分析), 在波峰处有 5% 振荡时, 对短波高效率回路:

$$t_f = 2.2 R_2 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (12-20)$$

$$t_{0.5} = 0.7 R_3 (C_1 + C_2) \quad (12-21)$$

4 有寄生电感的波形计算及调整

在发生器中,电容器、电阻等元件及回路引线有电感,尤其对大型发生器,由于级数增多,结构庞大,到试品间引线长,总电感较大,往往达到 $100\mu\text{H}\sim 250\mu\text{H}$ 。此电感对操作波不会有什么影响,但要影响雷电冲击波形。为了分析此电感影响,可按图 12-11 等值回路,认为有集中的电感和电容。在此 r, L, C 回路中(C 为 C_1, C_2 串联电容),其阻尼条件是 $r \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 这样,若 L 较大则要

相应较大的 r ,从而会使波前时间增大,很容易超过标准规定,因此要研究不完全阻尼条件,以减少 r 及波前时间。

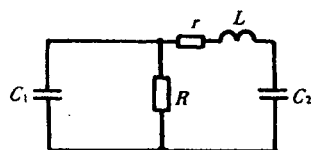


图 12-11 有寄生电感的等值回路
 C_1 —冲击电容 C_2 —负荷电容 R —波尾电阻
 L —电感 r —波前电阻

图 12-11 中,若为不完全阻尼,即 $r < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 当 C_1 充电电压为单位电压,则 C_2 上电压 u 为:

$$u = \frac{A}{(\lambda - \alpha)^2 + \omega^2} \left[e^{-\alpha t} - e^{-\lambda t} \left(\frac{\lambda - \alpha}{\omega} \sin \omega t + \cos \omega t \right) \right] \quad (12-22)$$

式中 $2\lambda + \alpha = \frac{1}{C_1 R} + \frac{r}{L}$

$$A = \frac{1}{C_2 L}$$

$$2\lambda\alpha + \lambda^2 + \omega^2 = \frac{r}{LC_1 R} + \frac{1}{LC}$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\alpha(\lambda^2 + \omega^2) = \frac{1}{C_1 C_2 R L}$$

在分析阻尼条件时,为简化计算,取 $R = \infty$, 则:

$$u = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[1 - \frac{\sqrt{\omega^2 + \lambda^2}}{\omega} e^{-\lambda t} \sin(\omega t + x) \right] \quad (12-23)$$

$$\tan x = \frac{\omega}{\lambda}$$

最大值时间 $t = n\pi/\omega$, 在 $t = \pi/\omega$ 时振荡电压最大,代入求得第二项振荡电压为:

$$\Delta u = \exp\left(-\pi \frac{k}{\sqrt{4-k^2}}\right)$$

式中 $k = r\sqrt{\frac{L}{C}}$

若按波形标准,允许峰值处振荡 Δu 为 5%, 则 $k = 1.38$, 即在参数计算中,取波前电阻 $r = 1.38\sqrt{L/C}$ 即可。

图 12-12 为 $C_1 = 0.083 \text{ } 3\mu\text{F}$, $C_2 = 0.006 \text{ } 2\mu\text{F}$, $L = 86\mu\text{H}$, $R_2 = 900\Omega$, 按图

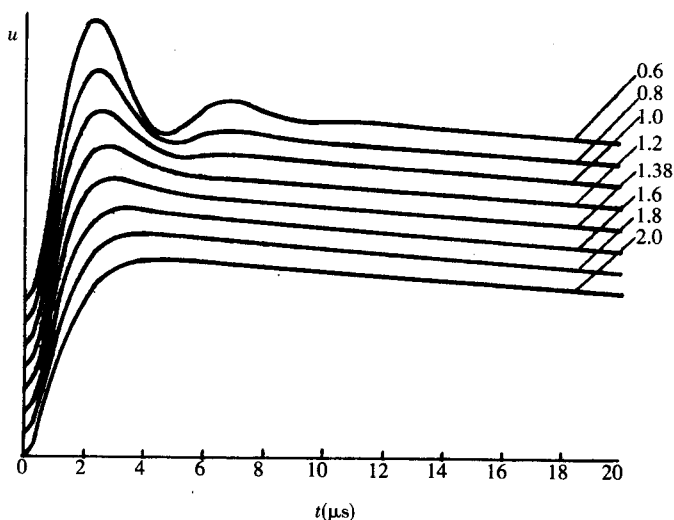


图 12-12 试品计算电压波形

12-11 回路,在不同 k 值时试品上电压计算波形,由此系列波形看, k 取 1.38 是可以的。

图 12-11 中,冲击回路看作集中参数,实际上,除集中参数元件(主电容、负载电容、波前电阻、波尾电阻)外,尚有分布参数的寄生电容和寄生电感,这些元件将组成很多振荡回路,而阻尼电阻 r 一般在发生器内部各级放置,它不能阻尼全部振荡,尤其是当发生器高压回路较长和不同高压引线处有相对集中负载电容时,试品电压不可能是光滑曲线,叠加很多高频振荡,而高压回路中各点电压不尽相同,集中电容大的点高频振荡分量弱,电容小的点则高频振荡分量强。

图 12-13 是分析除负载电容 C_3 外,在高压输出回路中尚有相对较集中电容 C_2 的回路,此回路难以求取各点电压表达式,但可作近似计算,图 12-14 是回路 $C_1=0.045\mu\text{F}$, $C_2=0.001\mu\text{F}$, $C_3=0.004\mu\text{F}$, $L_1=120\mu\text{H}$, $L_2=30\mu\text{H}$, $R_2=1480\Omega$, $R_1=230\Omega$ 时算得的 C_2 、 C_3 上电压,可看出此两电压均有振荡,而负载电容 C_3 大,振荡小。若回路分析中不考虑 C_1 、 R_2 ,则可求取 C_2 、 C_3 电压的表达式,此两电压均由一直流分量又加一振荡分量,其振荡频率与衰减情况相同,但幅值不同。以上分析说明,在大型发生器对高电压产品试验时,由于高压回路接线较复杂,测量分压器一定要直接接试品端,才能准确测量试品电压。

对于 500kV 大容量变压器及电抗器,若按峰值处上冲或振荡为 5% 调整,波前时间可能达到 $2.4\mu\text{s}\sim 2.8\mu\text{s}$,要减小波前时间只有减少波前电阻,此时振荡将增大,甚至到 30%~40%,波前时间仍达不到 $1.56\mu\text{s}$ 要求,如此大的振荡在标准上是不允许的。对产品绝缘考核而言,大振荡短波前和小振荡长波前两者比较,何种波形更严格尚应加以研究。

为了改善大负荷时的全波波形,减小峰值上冲或振荡,且能减小波前时间,可采用图 12-15 回路。图中 C_1 为主电容, C_2 为负荷电容, C_3 为与 R_1 并联的外加电容, R_1 为波前电阻, R_2 为波尾电阻, R_3 为线路寄生电阻及间隙弧道电阻, L_1 为发生器内部及外部回路电感(不包括波前电阻电感), L_2 为波前电阻电感, L_3 为 C_3 的电感。此回路的特点是在波前电阻 R_1 上并联电

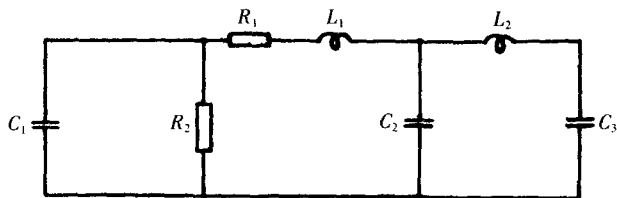


图 12-13 分析外部引线影响的回路

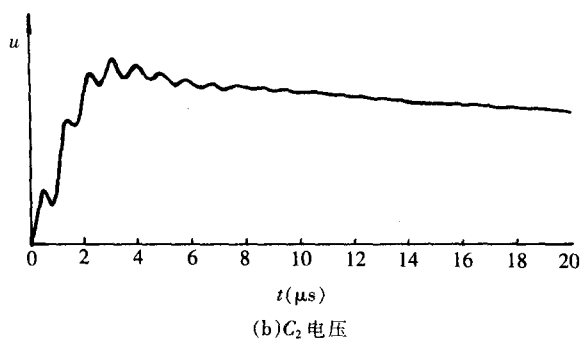
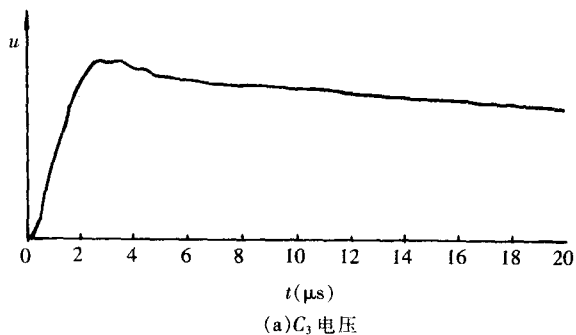


图 12-14 高压回路中不同点电压

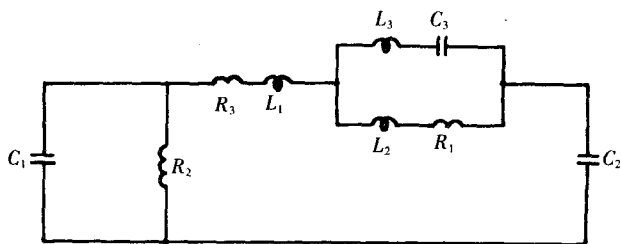


图 12-15 改善波前时间的回路

容 C_3 , 使 C_2 的充电电流除通过 R_1 外, 尚通过 C_3 , 加速 C_2 的充电, 从而减小波前时间。

图 12-16 为计算取得的试品 C_2 上的电压波形。计算参数为 $C_1=0.045\mu\text{F}$ 、 $C_2=0.005\mu\text{F}$ 、 $L_1=120\mu\text{H}$ 、 $L_2=30\mu\text{H}$ 、 $L_3=10\mu\text{H}$ 、 $R_2=1\,480\Omega$ 、 $R_3=16\Omega$ 、 C_3 分别取 n 组值, 其中 $C_3=0$ 即为没有 C_3 的常用回路。图 12-16(a)、图 12-16(b) R_1 分别为 125Ω 和 180Ω R_1 值时的波形计算结果。计算中取 C_1 电压为单位电压。

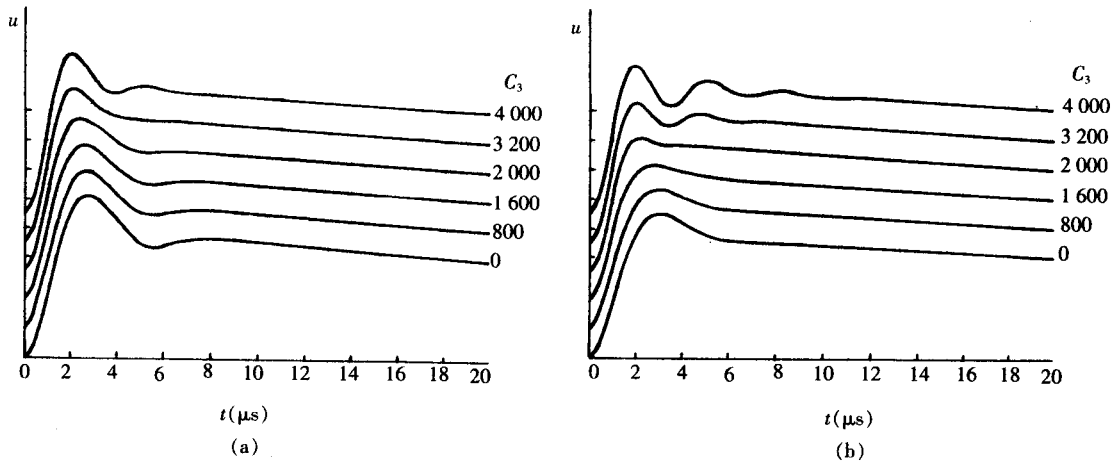


图 12-16 计算电压波形

从图 12-16 及表 12-2 可以看出, 对没有 C_3 的常用回路, 峰值上冲 27% 时波前时间为 $2.02\mu\text{s}$ ($R_1=125\Omega$), 峰值上冲 13% 时波前时间为 $2.17\mu\text{s}$ ($R_1=180\Omega$)。若用有 C_3 回路, 则随着 C_3 的增大, 波前时间缩小, 振荡减小。

图 12-15 回路已在试验中使用, 图 12-17 为在 SFP7-370 000/500 变压器试验时取得的波形, 发生器 3 000kV 运行, 无 C_3 回路(a), 在 $\Delta u=19.6\%$ 时波前时间为 $1.86\mu\text{s}$, 有 C_3 回路(b), 在 $\Delta u<5\%$ 时波前时间为 $1.47\mu\text{s}$ 。采用此回路后, 经适当调整, 一般高压变压器及电抗器均可得到符合标准的波形。

表 12-2 波形计算结果

C_3/pF	R_1	125/ Ω			180/ Ω		
		u_{max}	$\Delta u(\%)$	$T_1(\mu\text{s})$	u_{max}	$\Delta u(\%)$	$T_1(\mu\text{s})$
0		1.12	27	2.02	0.99	13	2.17
800		1.09	24	2.00	0.96	9	2.12
1 600		1.06	21	1.95	0.92	5	1.87
2 400		1.03	17	1.67	0.91	<3	1.47
3 200		1.04	11	1.52	0.95	6.5	1.46
4 000		1.08	19	1.49	1.00	11.3	1.40

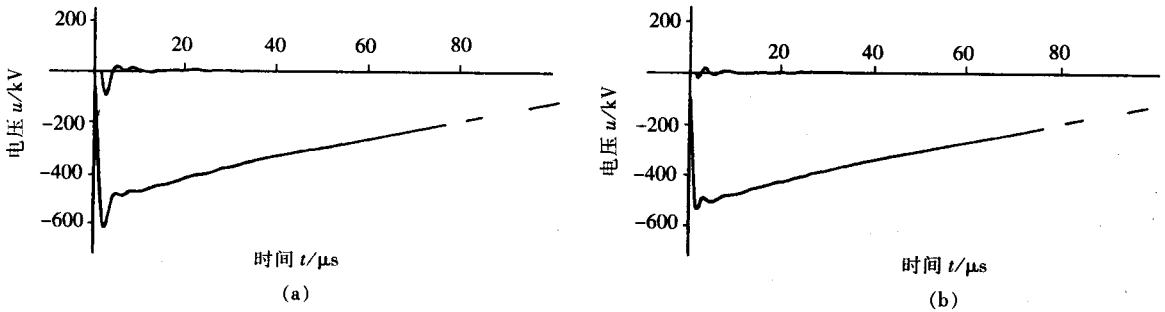


图 12-17 产品试验电压波形

5 变压器电感对波尾的影响

变压器雷电冲击试验时,非被试绕组短路接地,试品特性可用入口电容和电感来表征。入口电容影响波前时间,电感则影响波尾时间。试品电感值可用变压器的短路阻抗来求取,即

$$L_k = \frac{u_k^2 u_n}{100 \omega P_n} \quad (12-24)$$

式中 L_k ——相电感, H;

u_k ——阻抗电压, %;

u_n ——额定相电压, kV;

P_n ——额定相容量, MVA。

$$\omega = 2\pi f = 314$$

产品试验时的实际电感除计算电感外,尚要考虑试品接线,如三角形联结要考虑两相并联,而星形联结无中点接地则为一相与另两相并联后再串联等。对大容量低电压产品或大容量产品的低压绕组,有很小的电感值,这将影响冲击电压波形的半值时间。考虑到这些产品波尾不能保证,因此原 GB311—1964 标准中,规定半值时间大于 $20\mu\text{s}$ 即可,在 GB1094.3—2003 标准中规定,当半值时间不满足时经使用部门与制造厂协商,可以允许较大的偏差。在常规回路试验中,40MVA 的大容量产品 10kV 端只有约 $10\mu\text{s}$,难以试验。

当考虑变压器等值参数影响时,用图 12-18 线路,对于 L_2 大于 100mH~200mH 的高阻抗试品,电感对波尾影响不大,可用常用方法调整波形参数。当 L_2 在 20mH~100mH 时,电感将明显影响波尾,为分析其影响,忽略 C_2 、 L_1 、 R_2 ,用图 12-18(b)回路,若 C_1 充电电压为 E ,阻尼系数 $k < 1$ 时,试品上的电压 u 为衰减振荡波:

$$u = \frac{E}{\cos\varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (12-25)$$

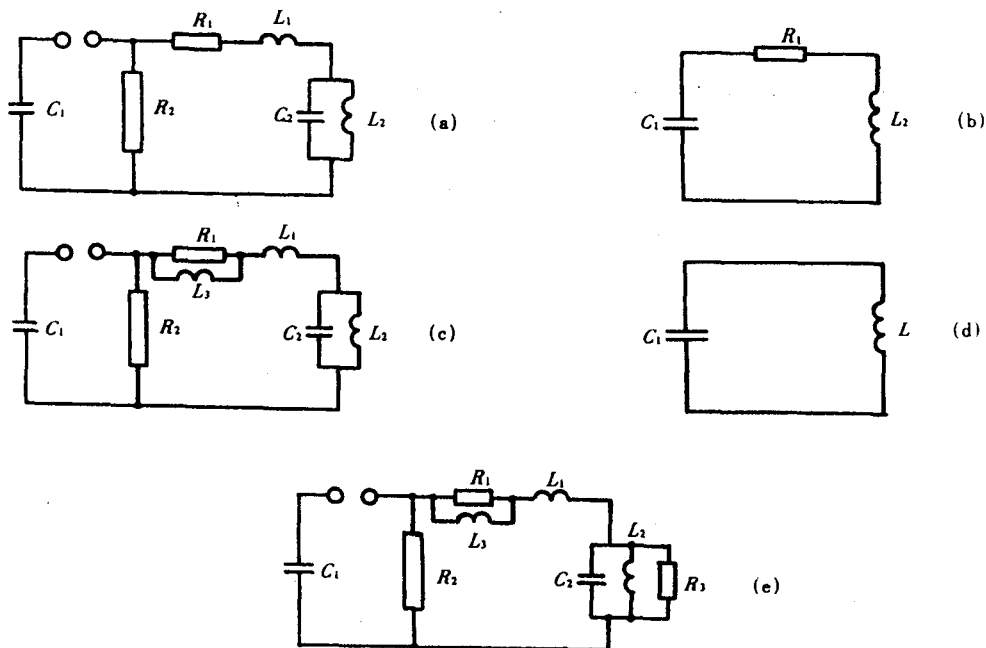


图 12-18 变压器电感的影响

$$\text{式中 } \omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_2 C_1}$$

$$\alpha = \frac{R_1}{2L_2}$$

$$\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$$

$$\text{衰减系数: } k = \frac{\alpha}{\omega_0} = R_1 / 2 \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}$$

上式为衰减振荡波,见图 12-19。

根据初步估算,令 $R_1=0$,则 $u=E\cos\omega_0 t$,半值时间为:

$$T_2 = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_2 C_1}$$

当 $R_1=0$ 时为无阻尼振荡,理论上过零反峰电压 u_r 为 100%,这是不符合标准的,必须有限尼电阻 R_1 。此时衰减振荡波在 $\omega t = \pi - \varphi$ 时反峰电压最大,为:

$$u_r = \frac{E}{\sqrt{1-k^2}} e^{-\frac{k}{\sqrt{1-k^2}} (\pi - \cos^{-1} \sqrt{1-k^2})} \quad (12-26)$$

当 $k=0.24$ 时,最大反峰电压 u_r 为 0.5。式(12-26)也可变为式(12-27),表示 u 与 k 和 $\sqrt{L_2 C_1}$ 的关系。

$$u = \frac{E}{\sqrt{1-k^2}} e^{-\frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \frac{t}{\sqrt{L_2 C_1}}} \cos\left(\sqrt{1-k^2} \frac{t}{\sqrt{L_2 C_1}} + \cos^{-1} \sqrt{1-k^2}\right) \quad (12-27)$$

当 $k=0.24$ 时,半值时间 T_2 为:

$$T_2 = 0.73 \sqrt{L_2 C_1}$$

由上述可见,为增大波尾时间,则要减小衰减系数 α 和降低振荡频率 ω 。当 L_2 一定时,则减小 R_1 和增大 C_1 , C_1 可能的最大值,受设备条件的限制,而因有回路电感 L_1 的存在,要有一定的 R_1 值来阻尼其振荡,因此也不能过小。此时可在三个方面采取措施,一是除发生器用适当的串、并联,尽量增大主电容外,尚可临时与发生器并上附加主电容。二是试品尽量靠近发生器,或在试品近旁临时组装发生器,以减小 L_1 ,从而可能减小 R_1 。若 R_1 减小而波前时间变短时,可在试品端并联负荷电容使波前时间达到标准。三是适当增大放电电阻 R_2 ,但应注意,增大 R_2 会使过零反峰电压增大,应保持反峰电压小于 50%。

当上述方法仍不能保证波尾时间时,可用图 12-18(c)回路,此回路是在波前电阻上并联电感 L_3 ,在波前电压上升时, L_3 的感抗大,由 R_1 与 C_2 决定波前时间。当充电电流脉冲过后,可看作 L_3 将 R_1 短路,不使电压有较大衰减,波尾时间近似由图 12-18(d)估计。试品上电压 u 为:

$$u = E \cos \omega t \quad (12-28)$$

$$\text{式中 } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}; L = L_1 + L_2 + L_3$$

式(12-28)是一振荡电压,亦应注意调整 R_2 ,使反峰值小于 50%。

调波电感 L_3 的大小,可按上述原则与 R_1 值配合选择,大致上在 $100\mu\text{H} \sim 800\mu\text{H}$ 。应特别指出的是,当用 L_3 调波时,试验回路通过较大电流,若用截断装置进行截波试验,因放电回路仅有 L_1 、 L_3 及截断回路电感,而 C_1 值很大,因此 L_3 上电流很大,要充分考虑其热容量及电动力,才能保证 L_3 安全

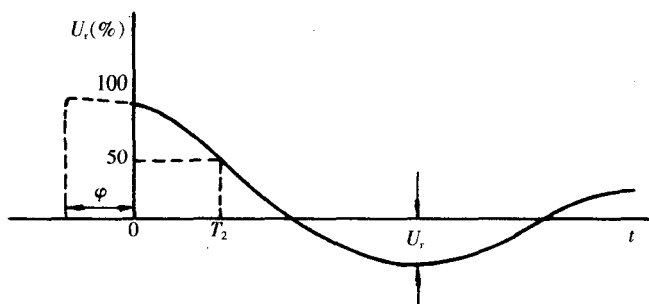


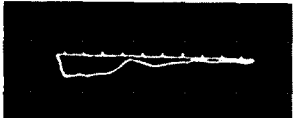
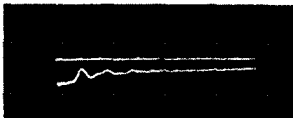
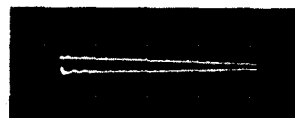
图 12-19 衰减振荡波

运行。

当试品电感特别小时(如在 5mH 以下),试品波形峰值处有振荡或过冲较大,也使半值时间变得特别短,此时可采用图 12-18(e)线路。此接线是在试品端部并联电阻 R_3 , R_3 的作用是在波前时与 R_1 形成分压,减小试品上的电压,限制振荡或过冲。 R_3 的选择条件是在波前时的电阻分压与波尾时的电感分压相同,即 $\frac{R_1}{R_3} = \frac{L_3 + L_1}{L_2}$ 。这种措施是有效的,能增加半值时间,其缺点是发生器的效率降低。

上述波尾时间保证方法已在产品试验中应用,表 12-3 为一试验实例,产品为 150MVA、220/110/13.8kV 电力变压器(YNyn0d5),低压绕组 13.8kV,产品低压侧 a、x 等端均引出,表 12-3 为低压端试验结果。由此例看出,大型变压器用常规回路试验低压端时 T_2 仅数微秒,而改善回路图 12-18(c)和 12-18(e)效果明显,图 12-18(c)回路 T_2 值较小是后部有振荡,半峰值时间由后部第一个振荡来求取,而实际波形已有很大改善。

表 12-3 150MVA、220/110/13.8kV 电力变压器低压端试验结果

试验回路	图 12-18(a)	图 12-18(b)	图 12-18(c)
回路参数	$C_1=1.8\mu\text{F}$ $R_1=100\Omega$ $R_2=2\ 000\Omega$ $L_1\approx 100\mu\text{H}$	$C_1=1.8\mu\text{F}$ $R_1=100\Omega$ $R_2=2\ 000\Omega$ $L_1\approx 100\mu\text{H}$ $L_3\approx 400\mu\text{H}$	$C_1=1.8\mu\text{F}$ $R_1=100\Omega$ $R_2'=100\Omega$ $R_2=2\ 000\Omega$ $L_1\approx 100\mu\text{H}$ $L_3\approx 400\mu\text{H}$ $C_0=3\ 500\text{pF}$
波形参数	$T_1=0.6\mu\text{s}$ $T_2=3.6\mu\text{s}$	$T_1=0.5\mu\text{s}$ $T_2=5\mu\text{s}$	$T_1=1.2\mu\text{s}$ $T_2=40\mu\text{s}$
波形 (扫描时间不同)			

注: C_0 为试品并联外加电容。

除上述方法外,GB1094.3—1985《电力变压器》标准和 GB7449—1987《冲击试验导则》中规定,当改变 C_1 和 R_2 不能保证半值时间时,可以改变试品的接线以增加其阻抗:

(1)非试绕组的高压端子经电阻接地,这将使试品的被试绕组的阻抗显著增大。但必须保证非试绕组端子上的电压不超过该绕组的额定耐受电压的 75%。

(2)自耦变压器被试绕组的非试端子(接地端除外),可以通过小于 400Ω 的电阻接地,但应保证非试端子上的电压不超过本身额定耐受电压的 75%。

(3)当被试绕组是全绝缘或三角形联结绕组,被试绕组的非试端允许通过小于 500Ω 的电阻接地,但应保证非试端子上的电压不超过本身额定耐受电压的 75%。

上述支撑方法的电阻值一般在 $100\Omega\sim 300\Omega$ 之间。试验时用支撑电阻的本身组成电阻分压器来测量支撑点的电压,使其不超过额定耐受电压的 75%。应该指出,在新的 IEC 60076-3:2000 标准及试验导则中规定,对星形联结绕组,非试端电压限制为小于 75%,但对三角形联结绕组,则要求小于 50%。

当非试端用电阻支撑时,支撑电阻承受了一部分电压,改变了绕组的波过程,使绕组的匝间、段间梯度及对地电位分布均发生变化,虽然支撑电阻使入端电压波长增加,但对考核绕组绝缘不一定合适。因此导则中提出最好还是选择较短的半值时间。

实用上,图 12-18(c)和图 12-18(e)线路的调整较繁,而支撑法简单,效果显著,因此目前多用标准规定的支撑法来保证半值时间。

6 冲击电压发生器设计、运行有关问题

在冲击电压发生器设计中,要解决很多技术问题,如线路选择等,各主要元件(如高压充电变压器、整流元件、电容器元件、支柱材料和电阻元件等)的选择设计,发生器同步系统设计、内外绝缘的计算,合理的总体结构,机械强度及稳定性的计算等,要进行经济技术分析比较,结合实际,多方全面分析后才能设计生产。在此,不是论述设计和全部问题,只是介绍一些与运行有关的问题及给出两个发生器实例。

发生器内部电阻元件有充电电阻、放电电阻及波前电阻,在运行中,这些电阻要经常更换调整,容易损坏。电阻要考虑温升、绝缘及电感问题,波前电阻的寄生电感要尽可能小。

在发生器工作过程中,各电阻均不通过恒定电流,而是脉冲负载。在温升计算中,以绝热过程来统计,能量引起电阻温度升高,等值的单次冲击温升取 $150\text{K}\sim 200\text{K}$,相对于每级的电阻线径按式(12-29)计算,若电阻元件用双线并绕,则应按两线截面和与计算线径截面相等选取,设单线线径为 d' ,则 $d'=d/\sqrt{2}$ 。计算中要考虑缩短电阻线长,以有利于减少电感及增大绝缘。

$$d = \sqrt{\frac{16\rho W}{\pi^2 R r C_m \theta}} \quad (12-29)$$

式中 W ——元件消耗每级能量, J;

ρ ——电阻系数,镍铬丝为 $1.1\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$;

R ——元件电阻值, Ω ;

r ——密度,镍铬丝为 $8.4\text{g}/\text{cm}^3$;

C_m ——热容量,镍铬丝为 $460.55\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

θ ——单次冲击温升,取 $150\text{K}\sim 200\text{K}$ 。

电阻元件的固有电感,各种电阻要求不同。对放电电阻及充电电阻,因阻值较大,且电感对波形影响小,电感可较大,充电电阻甚至可用单线有感缠绕电阻。对波前电阻则要求严格,要用无感绕法。电阻有板形和圆形两种,圆形一般有四种结构,图 12-20(a)骨架不用开槽,为双绕双层反向绕法,内层绕完后包层间绝缘,再绕外层。另三种圆形结构骨架要开槽,可开螺纹槽或直槽,然后开

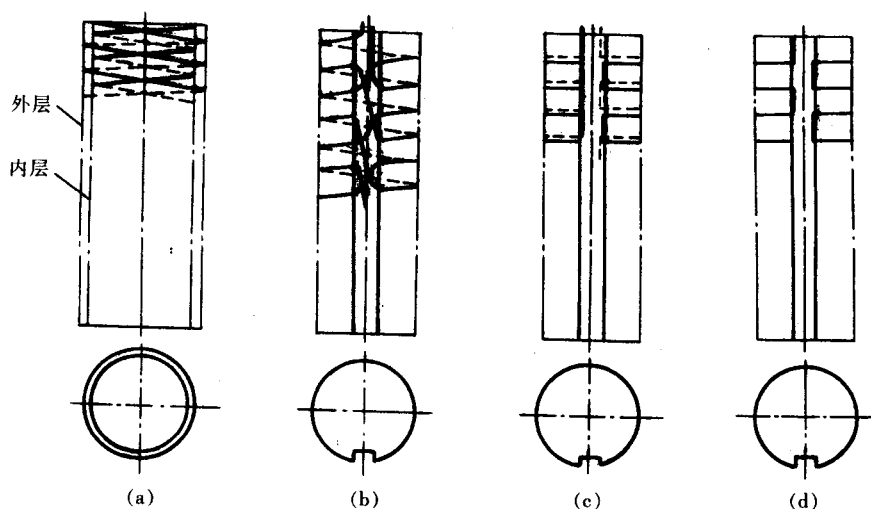


图 12-20 圆形电阻型式

纵向换位槽。在这两种骨架上,可有三种绕法。图 12-20(b)表示用螺纹槽的双线单层反向绕法,即双线绕在同一层中,但两根线有一定匝距,双线交叉处在换位槽内,且垫以绝缘。图 12-20(c)表示用直槽的双线单层反向绕法,两根反向线没有匝距,放在同一直槽中,图中实线和虚线分别为正反向电阻线。图 12-20(d)为单线单层反向绕法,两匝间有匝距,类似绕法的板形电阻电感比圆形电阻电感大。从工艺上看图 12-20(a)骨架不用开槽,两层电阻可用车床缠绕,比较方便,图 12-20(b)骨架开螺纹槽,较直槽方便,后三种绕法均要用手工操作。电感方面,以图 12-20(d)最小,其他三种较大。电阻的电感值与结构、容量和线长有关,级电压及级容量较低时,每级波前电阻电感约为 $1\mu\text{H}\sim 5\mu\text{H}$, 300kV 级容量较大的电阻电感大于 $4\mu\text{H}\sim 5\mu\text{H}$,若不注意,甚至达 $15\mu\text{H}$ 。虽然图 12-20(c)绕法电感最小,但从绝缘方面考虑。因正反向匝数放在同一槽中,交叉换位处不好加绝缘,因此交叉处及正反线间容易放电,而其他三种结构正反线间有一定距离,交叉处绝缘也好处理。在选择电阻结构时,这些因素都要综合考虑。

由于电阻元件是按发生器每级容量及电压设计的,均匀分布在发生器内部,当发生器串并联运行及进行波形调整时,一定要考虑其承受电压及容量,否则将会损坏电阻元件。

多级发生器的同步稳定性是极为重要的问题,它会影响发生器的正常运行。多级发生器的同步,通常是用球间隙,在外施同步讯号或自同步情况下启动。由发生器工作原理可知,各级球的同步过电压受寄生电容分布影响,对于大型发生器,由于结构增大,随之级间电容增大,从而使过电压降低。空气环境污染及湿度对稳定性也有很大影响。发生器在某些运行情形下,例如操作波试验充电时间较长、波前电阻较大,雷电短时放电电阻较小等,这些都对同步带来不利影响,运行困难。因此要研究各种改善同步性能的方法。

对于常用的球极同步系统,球极的传动有两种方式,即转动式和移动式。前者动球固定在一根转轴上,电动机经变速箱带动转轴转动,以达到调节球距的目的。此法传动机构简单,其主要缺点是启动性能不好,因第一级球的点火三间隙在球的中心,在转轴的某一位置,此间隙可对正另一球心,易于启动,但若转到另一位置,则不能对正球心,从而不能保证启动稳定。移动式动球极不直接固定在转轴上,而是通过一个变向器,将转轴的转动变为球极的移动,使在任何球极间隙距离下,点火电极均对准球心,有利于同步。

其他改善方法有采用充压缩气体的密封间隙、通以干燥清洁空气的封闭球间隙、在每级球极均用三电极间隙、多极点火间隙等。下面简要介绍多极点火间隙同步系统。

图 12-21 为同步系统线路,虚线部分为多极点火间隙,由两部分组成,即间隙主体和脉冲变压器。当发生器充电电压为 u ,均压电阻 r 使直流电压均匀分布于 n 个串联小间隙,每个间隙电压为 $\frac{u}{n}$ 。电源脉冲装置经同步元件电阻 R_2 和引燃电阻 R_1 给电容器 C_T 充电,其后各级充电电流还通过脉冲变压器的前级原绕组 W_1 和第三绕组 W_3 。发生器同步运行时,启动按钮 K ,反极性脉冲输入脉冲变压器,使间隙 P_1 引燃工作, C_T 通过脉冲变压器的原绕组 W_1 放电,在高压绕组 W_2 中产生高压脉冲 E 加到主体间隙,由于过电压,使串联小间隙由两边向中间逐个放电,当发生器充电电压大于每个小间隙放电电压 e 时,使整台间隙放电。在前级高压绕组 W_2 产生 E 去启动本级多间隙的同时,第三绕组 W_3 亦产生高压通过同步电容 C_k 去启动后级,这样使发生器的整个同步系统同步启动。

多极点火间隙同步系统的主要优点是可在 $10\%\sim 100\%$ 很宽的充电电压范围内可靠地动作,与发生器的结构因素、放电回路和输出波形无关。此系统没有传动调节机构,易于做成封闭式,且可通过干燥空气,避免灰尘和湿度的影响。图 12-22 为 300kV 单台间隙外形图。

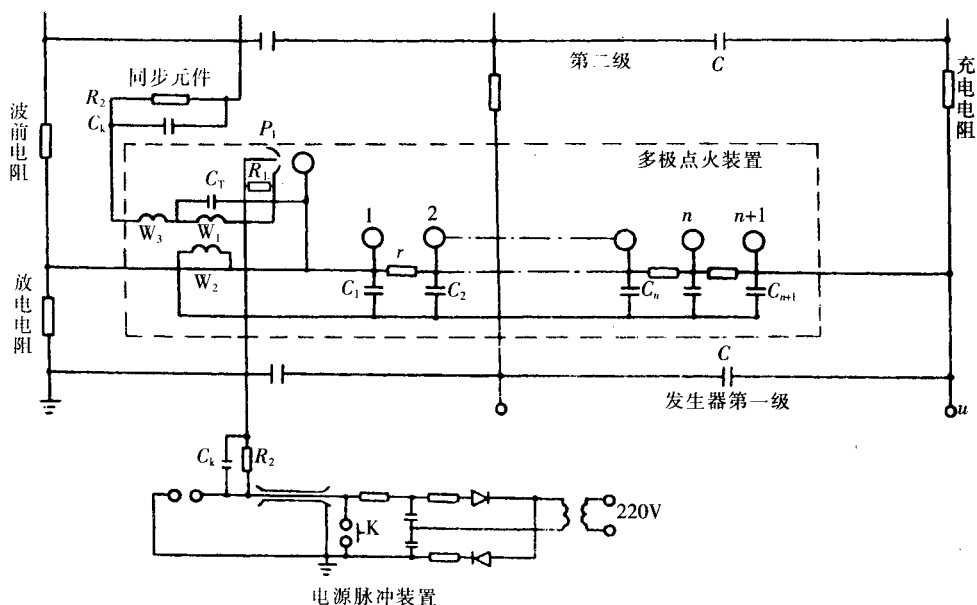


图 12-21 多级点火间隙同步系统线路图

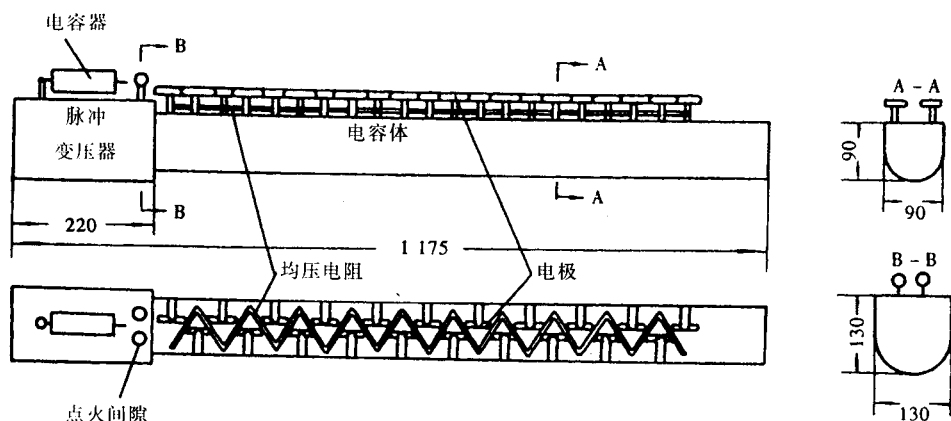


图 12-22 单台间隙外形图

在发生器设计中,要适当选择内部各元件绝缘水平及间隙的距离,要避免直流静电感应,正确处理电木管件的接口位置,对在内部可能出现的电木板与空气间隙的混合绝缘,要考虑其电压分布。

关于发生器的外绝缘,应将试验厅设计与顶罩设计统一考虑。发生器雷电冲击运行时,以正极性尖对板间隙的放电电压最低,应以此选择绝缘距离,由于放电电压与间隙距离成正比,一般不会有问题,均容易满足。但在操作波正极性运行时,间隙放电电压不与距离成正比,有饱和现象,即在大距离下间隙长度的增加对放电电压影响较小。因此对高电压发生器的运行要特别注意,不能单靠增大距离来提高放电电压,而要增加顶罩的曲率半径,改善电场,此间隙绝缘可用球板间隙来分析。

图 12-23 为 3 000kV 发生器布置图,可产生雷电波和操作波。级电压 300kV,级电容 $0.45\mu\text{F}$,冲击电容 $0.045\mu\text{F}$,能量 202.5kJ,总高 9.8m,总重 20t。主电容为铁壳式电容器,每级两台串联,平放在托架上。托架由四根直径为 $\phi 320\text{mm}/\phi 400\text{mm}$ 瓷支柱支撑,支柱中心距为 $1.2\text{m}\times 2.1\text{m}$,支柱与托

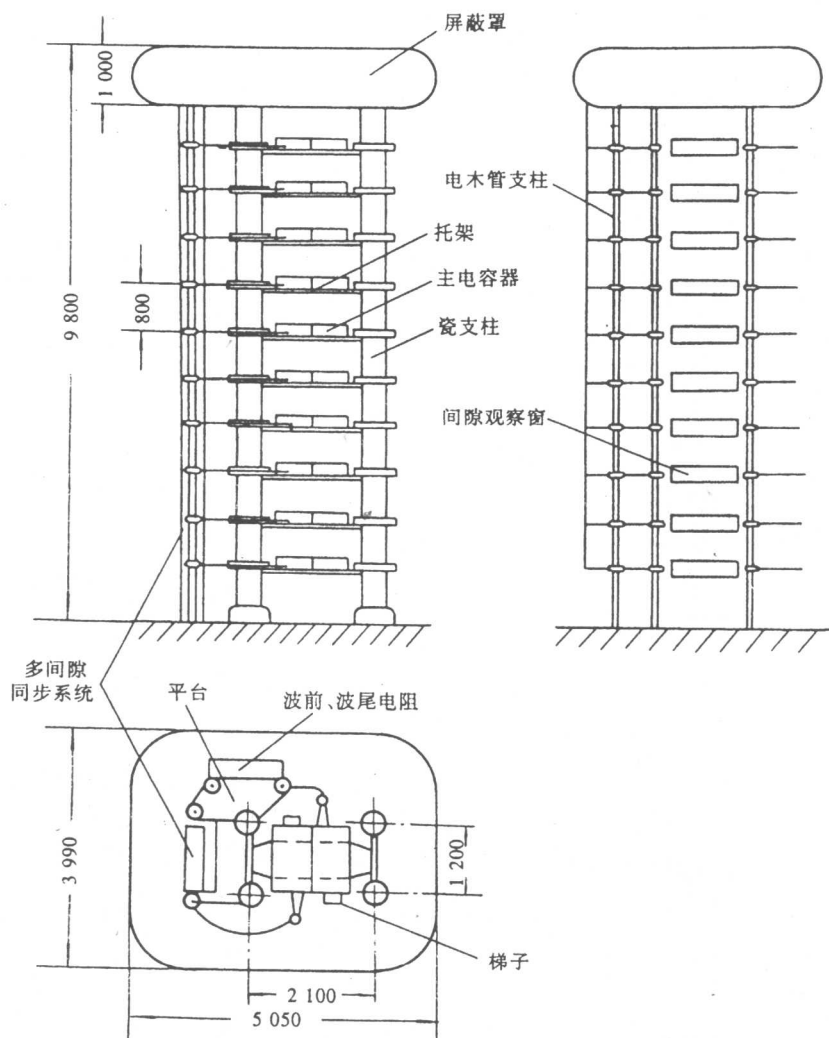


图 12-23 3000kV 发生器布置图

架的连接考虑到瓷件不受弯曲应力，外部有四根小电木支柱，用于固定波前和波尾电阻元件及多极点火装置。发生器顶部装有 $5\text{m} \times 4\text{m} \times 1\text{m}$ 组合式屏蔽罩，由 800 个 $\phi 200\text{mm}$ 的铝制圆盘组成。发生器使用了多极点火间隙同步系统，全部封闭在 $1.3\text{m} \times 0.2\text{m} \times 9\text{m}$ 的绝缘盒内，可通以经过过滤的空气，该点火系统使用方便，同步性能稳定可靠。发生器的操作控制系统可手动控制和自动控制，自动调节调压器，整定电压和充电电压有数字显示，使用方便。

图 12-24 为 1800kV 发生器外形照片，其线路见图 12-8，发生器共 12 级，级电压 150kV，每级两台 75kV, $2\mu\text{F}$ 电容器串联，冲击电容 $0.083\text{ }\mu\text{F}$ ，能量 135kJ。发生器有 7 根支柱，其中 4 根支撑电容，3 根支承电阻元件及点火同步系统。

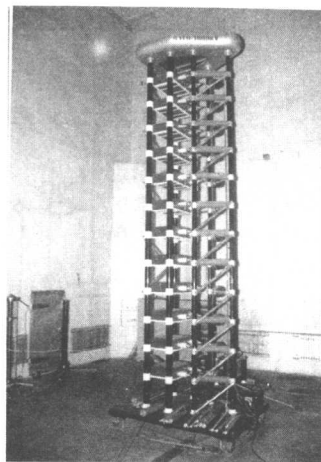


图 12-24 1800kV 发生器照片

第三节 截断装置

1 截断装置的型式

国家标准规定,变压器、电抗器、电压互感器等带有绕组的产品要进行截波试验,推荐使用可控截断间隙在波尾截断,也允许用简单的间隙在波前截断,标准截断时间为 $2\mu\text{s}\sim 6\mu\text{s}$ 。

波前截断时,可用球间隙或棒对棒间隙。因截断时间大于全波标准波前时间,为取得波前截断,要增大波前电阻,使波前时间大于截断时间,提高全波电压幅值以取得波前截断。也可以在发生器冲击回路中串联电感,使发生器输出一个振荡电压,在第一个峰值前产生截断,所加电感值由所要求的振荡频率来决定。当用振荡波截断时,会有较高的效率。

在波前截断时,每次试验要重新调整线路参数,全波与截波不能按标准要求的顺序试验,工作效率较低,因此若条件允许,最好使用可控截断装置。可控球隙截断装置原理图见图 12-25。为取得单球极波尾截断,可在下球极放电点处加上点火间隙 G_2 ,将球隙 G_1 增大,全波时不放电,要截断时用经一定时延的脉冲信号启动 G_2 ,引起 G_1 放电,即取得延时的波尾截断。 G_2 的形成,较好的是在球表面开一小孔,形成三间隙,当球极用作峰值测量时,将球转一角度或更换带孔球极,使放电部位为光滑球面。

延时脉冲同步信号可用两种方法产生,

一是通过负荷电容器或第一级放电电阻取得信号,经时延电缆或时延线路送到间隙 G_2 ,电缆长度或时延线路性能决定截断时间,二是用点火装置 M,它可产生一个可随意调整时延的高压脉冲去启动 G_2 。

此种装置的球极由 $\phi 250\text{mm}$ 到 $\phi 2\,000\text{mm}$,可用于高达 500kV 级产品试验。图 12-26 是 300kV 单球截断线路,间隙用 $\phi 250\text{mm}$ 带点火间隙的球极,由分压器产生低的同步电压信号,通过 LC 时

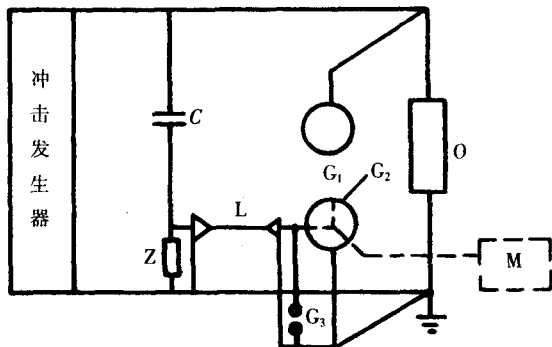


图 12-25 可控球隙截断装置线路图

C—负荷电容 O—试品 L—时延电缆 M—点火装置 Z—阻抗元件 G_2 —保护间隙

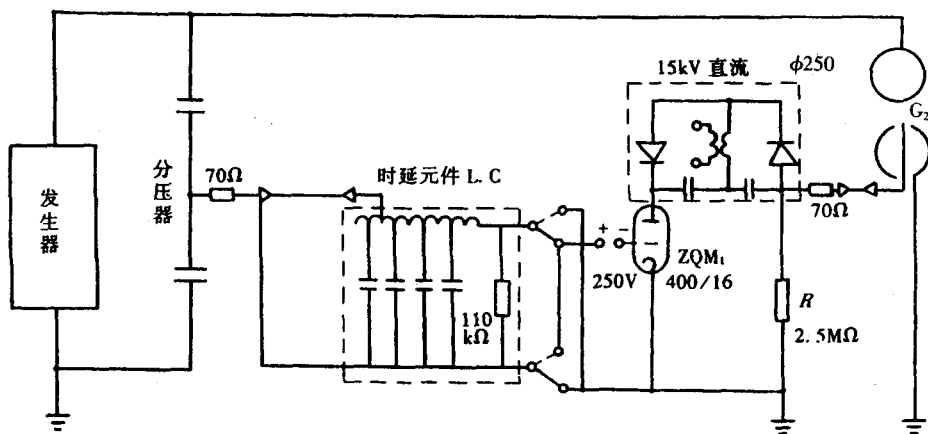


图 12-26 300kV 单球截断线路

延元件起动高压闸流管,该管使高压电容器接通,在电阻 R 上产生 15kV 脉冲电压使三电极间隙放电,产生截波。截断时延由 LC 调节,分 43 段,总电感 $3\,000\mu\text{H}$,总电容 $2\,300\mu\text{F}$ 。产生 $2\mu\text{s}\sim 3\mu\text{s}$ 截波。

多间隙截断装置原理图见图 12-27。结构上是多个间隙 S 串联,电容分压器与其并联使其均压,电容器和间隙之间连接跨越电阻 R ,目的为保护电容器,减少间隙短路时的放电电流,阻尼振荡。在机械结构上,按级电压高低选择半球直径,所有上球或下球与机架固定相连,而另一半球安装在一长方形框架中,由传动机构使框架上下移动,因而各级球距同时变化。为了更好地同步启动,下部若干级球极做成三间隙。设备配备触发控制装置和脉冲放大器,根据产品试验施加电压范围,选择级数,调整球隙。分压器输出 $50\text{V}\sim 1\,000\text{V}$ 电压到触发控制装置,经延时后到脉冲放大器,输出约 12kV 给第一级三间隙点火, C_0 经 R_{g1} 和 R_{g2} 放电,在 R_{g2} 上的电压给第二级点火,由于此点火及下级间隙放电接地时,使上级间隙电压升高,相继引起以上各级放电,产生截波。

图 12-28 为 $2\,400\text{kV}$ 截断装置外形图,电容器柱分 4 单元,共 12 级,每级电压 200kV ,电容 C_0 为 $7\,200\text{pF}$,串联电阻 R_0 为 10Ω ,每级跨接电阻 R 为 600Ω ,12 级运行时电容 600pF 。

2 截断装置的运行

对于截断装置的运行,要考虑截断可靠性、截断时间稳定性及产生的截波波形。

由于截波试验电压比全波要高,因此必须保证装置可靠动作,否则幅值为截波试验电压的全波电压将加到试品上,会产生不应有的绝缘损伤。因此要控制好间隙距离,若

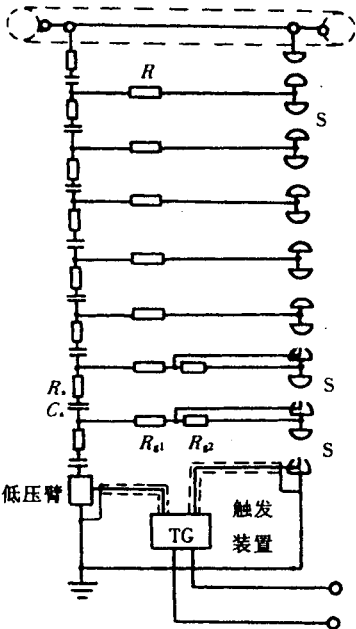


图 12-27 多间隙截断装置原理图

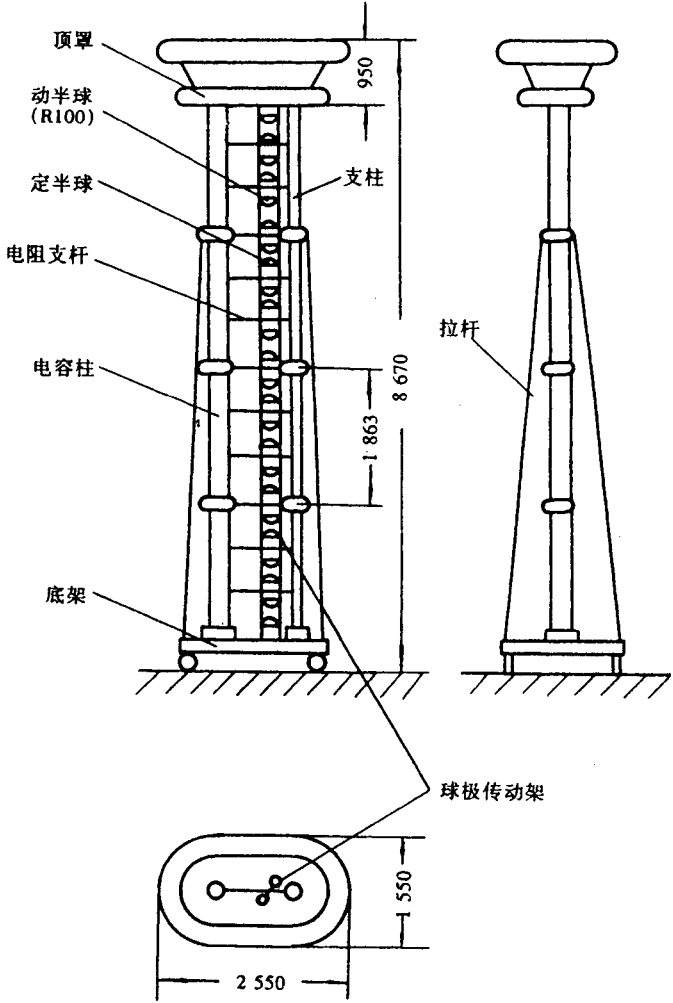


图 12-28 $2\,400\text{kV}$ 截断装置

距离太小会造成自截失控,距离太大,则会造成拒截失控。间隙距离不应过大,宁可有一点自截失控的几率,而不允许拒截失控。

多间隙截断装置的截断可靠性用触发范围来表示。最大触发范围为无触发时最大耐受电压 u_1 与有触发时能 100% 截断的最低电压 u_2 差值比最大耐受电压,即 $M = \frac{u_1 - u_2}{u_1}$ 。装置的触发范围与触发时延分散性有关,若时间分散性大则触发范围大,分散性小则范围小。图 12-29 为 TDJ2400-750 型装置的负极性运行曲线,表示出第一级间隙距离为 d 时的 u_1 、 u_2 和 M ,不同运行电压时,最大触发范围约在 27%~34% 之间。试验表明,正极性触发范围较负极为低,仅约 4%。

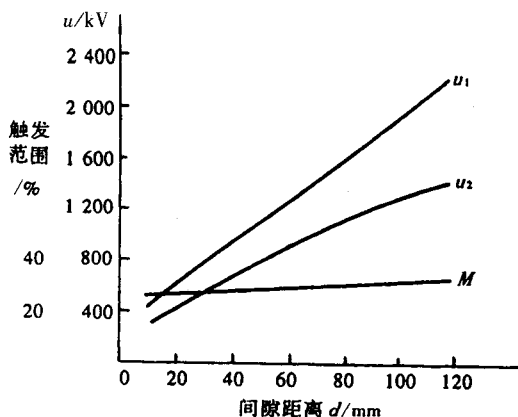


图 12-29 截断装置运行曲线

在变压器的雷电截波冲击试验中,产品的质量判断是比较高低电压下的电压电流波形,截断时间的不同将使电流波形变化,不利于试验结果的分析判定,因此要尽可能保证截断时间稳定。试验电压截断时间是否稳定由冲击电压发生器点火同步稳定性、触发系统稳定性及截断装置动作稳定性等三个因素所决定。

根据试验研究,经适当调整,多间隙截断装置的截断时间分散性可控制在 $\pm 0.1\mu s$ 内。但在生产试验中,由于频繁操作,试验人员较多,且要尽快完成任务,因而不可能很精细地调整球距,会带来较大分散性,一般不超过 $\pm 0.2\mu s$ 。

装置所产生的截波波形要稳定,截断陡度、过零系数等不应有变化,截断点要分明,截断后附加振荡小,这有助于截波试验质量控制。

第四节 冲击电压测量

1 冲击电压测量系统及其误差分析

冲击电压常用的测量装置有球极和分压器测量系统。球极用于测量电压峰值,标准中对球极结构、布置、使用等有明确的规定,只要按规定条件使用,其准确度为 $\pm 3\%$,是一种较好的峰值测量装置。分压器测量系统可测量峰值及波形,其低压仪器常为高压示波器、数字示波器和峰值电压表,峰值电压表把单次过程的电压值转换为稳定指示的电压值。

高压试验中测量冲击电压的主要装置是分压器示波器测量系统。系统组成见图 12-30,主要由高压引线、分压器、同轴电缆和测量仪器组成。测量系统测得电压 u_A 应与测量点输入电压 u_A 波形相同,仅电压值按分压比 k 降低。实际上,冲击波在高压引线 Y 上多次反射,分压器输入电压不同于 u_A ,分压器使波形衰减和振荡,测量电缆 Z 两端有折反射,且有衰减,测量仪器亦有误差,这些因素使输入电压 u_A 与测量电压 u_A 。

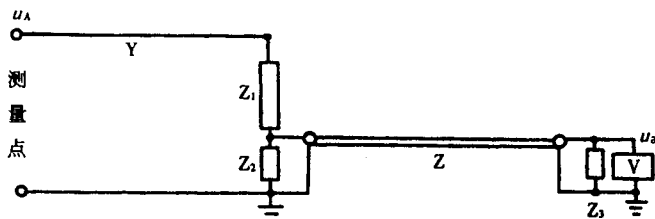


图 12-30 分压器测量系统

Y—高压引线 Z_1 、 Z_2 —分压器 Z —电缆 Z_3 —匹配阻抗
V—测量仪器仪表

不同,产生测量误差。

在高压测量系统中,主要用系统的方波响应作为衡量测量系统性能的依据。测量系统为线性四端网络,如在其输入端输入单位方波,其输出波形即为系统的方波响应。因为任何电压波形均可分解为一系列方波的叠加,若方波响应已知,即可由堆叠积分求得任意输入波形时的输出,从而确定在该输入波形时的测量误差。其波形分解原理见图 12-31。当 $t=$

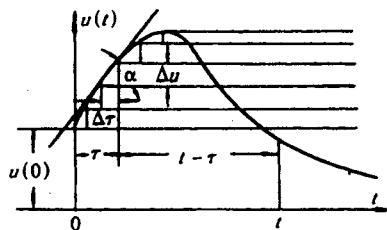


图 12-31 波形分解

0 时,接上直流电压 $u(0)$,然后接上许多单元的直流电压 Δu ,这些单元直流电压彼此相距一个时间间隔 $\Delta \tau$ 。在电压曲线上升部分, Δu 为正,下降部分为负。若四端网络的响应为 $g(t)$,由直流电压 $u(0)$ 所产生的分量为 $u(0)g(t)$ 。在 t 瞬间,由 Δu 所产生的分量等于 $\Delta u g(t)$,这个电压是在电路闭合延时 τ 后才接上去的,在时间 τ 后才开始作用。通过对各直流电压单元响应的积分,可求得输入电压 $u(t)$ 的输出为:

$$u_1(t) = u(0)g(t) + \int_0^t u'(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (12-30)$$

$$\text{或} \quad u_1(t) = g(0)u(t) + \int_0^t g'(\tau)u(t-\tau)d\tau \quad (12-31)$$

一般的系统响应见图 12-32,为衰减振荡型或指数上升型,响应与方波间的面积 T 为响应时间,振荡型响应时间为正负值之总和。

$$T = \int_0^\infty [1 - g(t)] dt$$

(12-32)

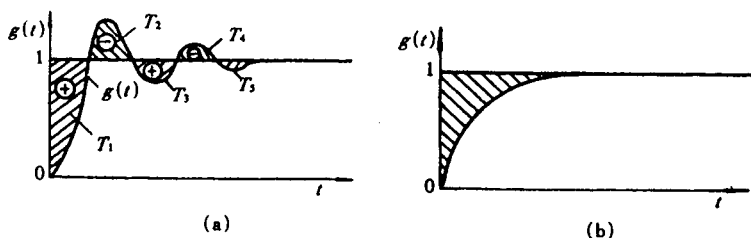


图 12-32 测量系统响应

下面分析全波、截波及斜角波的测量误差。

全波电压为:

$$u(t) = e^{-P_1 t} - e^{-P_2 t} \quad (12-33)$$

若方波响应为:

$$g(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (12-34)$$

$$T = \frac{1}{\lambda}$$

则全波响应电压:

$$u_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda - P_1} (e^{-P_1 t} - e^{-\lambda t}) - \frac{\lambda}{\lambda - P_2} (e^{-P_2 t} - e^{-\lambda t}) \quad (12-35)$$

对于 $t=\tau$ 时截断的截波,可以看作在 $t=\tau$ 时加入一个负冲击波:

$$u(t) = -[e^{-P_1 \tau} e^{-P_1(t-\tau)} - e^{-P_2 \tau} e^{-P_2(t-\tau)}] \quad (12-36)$$

此负冲击的响应可同样算得:

$$u_2(t) = -\frac{\lambda}{\lambda - P_1} e^{-P_1 \tau} [e^{-P_1(t-\tau)} - e^{-\lambda(t-\tau)}] + \frac{\lambda}{\lambda - P_2} e^{-P_2 \tau} [e^{-P_2(t-\tau)} - e^{-\lambda(t-\tau)}] \quad (12-37)$$

则截断后的总响应为:

$$u_3(t)=u_1(t)+u_2(t)=e^{-\lambda(t-\tau)}\left[\frac{\lambda}{\lambda-P_1}(e^{-P_1t}-e^{-\lambda t})-\frac{\lambda}{\lambda-P_2}(e^{-P_2t}-e^{-\lambda t})\right] \quad (12-38)$$

图 12-33 为雷电冲击波通过响应为 $g(t)=1-e^{-\lambda t}$ 系统时产生误差情况,输入电压 $u(t)$ 为曲线 3,而输出为曲线 6,在波前部分电压值有差别。若在 τ 时截断,输出电压按曲线 7 变化,将产生电压误差 Δu 。

当输入电压为 $u(t)=at$,即以陡度 a 上升的斜角波,利用式 (12-30), $u(0)$ 为零,则响应电压为:

$$u_1(t)=\int_0^t ag(\tau)d\tau$$

当方波响应为式 (12-34) 时, $u_1(t)$ 为:

$$u_1(t)=at-\frac{a}{\lambda}(1-e^{-\lambda t}) \quad (12-39)$$

测量误差为:

$$\Delta u=u(t)-u_1(t)=\frac{a}{\lambda}(1-e^{-\lambda t}) \quad (12-40)$$

当时间较短, $g(t)$ 未达到稳定值的某一时刻 t_1 ,误差为 $\Delta u(t_1)$,而响应达稳定值后,误差 $\Delta u=\frac{a}{\lambda}=aT$,亦即测量误差与陡度 a 及响应时间 T 成正比,输出电压波为与输入斜角波平行的直线,将直线段延伸到 t 轴,其交点与原点的距离等于响应时间 T ,见图 12-34。

由以上分析可见,系统的方波响应时间直接影响电压测量误差,为此,在原 GB311.4—1983 国标中,当测量不同电压时,对方波响应时间有不同的要求,其值见表 12-4。而在新标准 GB/T16927.2—1997 中,对测量系统的比对测量、阶跃波(方波)响应也提出了明确的要求。

2 冲击电压分压器

根据分压器本身所用的不同阻抗,分压器共有四种基本型式,即电阻分压器、电容分压器、串联阻容分压器和并联阻容分压器,见图 12-35。

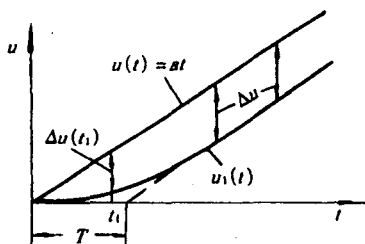


图 12-34 斜角波测量误差

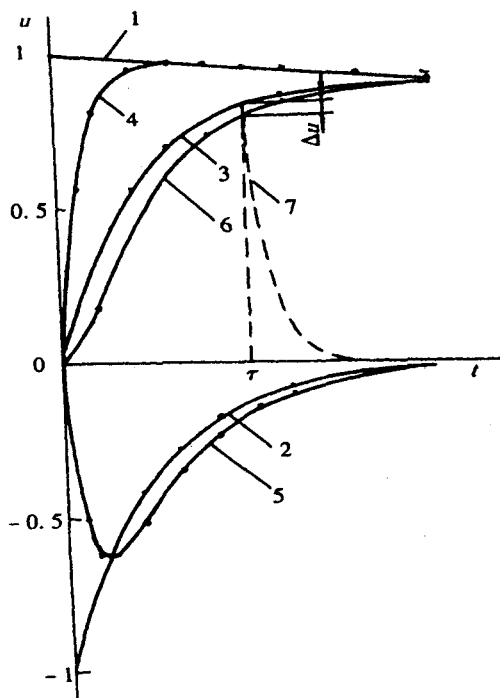


图 12-33 冲击波形响应曲线

- 1— e^{-P_1t} 2— e^{-P_2t}
 3— $u(t)=e^{-P_1t}-e^{-P_2t}$
 4— $\frac{\lambda}{\lambda-P_1}(e^{-P_1t}-e^{-\lambda t})$
 5— $\frac{\lambda}{\lambda-P_2}(e^{-P_2t}-e^{-\lambda t})$
 6— $u_1(t)$ (曲线 4 加曲线 5)
 7— τ 截断后波形 $u_3(t)$

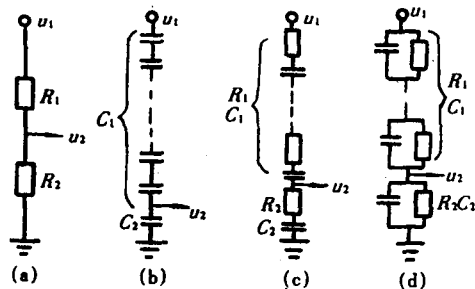


图 12-35 不同型式分压器

- (a)电阻分压器 (b)电容分压器
 (c)串联阻容式分压器 (d)并联阻容式分压器

表 12-4 对方波响应时间的要求

被测冲击波	要 求
1.2/50 μ s 雷电冲击全波及在波峰或波尾处截断的雷电冲击截波	$ T \leq 0.2\mu\text{s}$
线性上升的雷电冲击截波, 上升时间为 T_r	$ T \leq 0.05T_r$ 且 $ T \leq 0.2\mu\text{s}$
非线性上升的、在 T_r 处截断的冲击截波	$ T \leq 0.05u_{\text{max}}/S_1$
所有操作冲击波, 波前时间 T_a , 截断时间 T_c	$ T \leq 0.03T_a$ 及 $ T \leq 0.03T_c$

电阻分压器的高、低压臂均为电阻, 高压臂阻值为 $10\text{k}\Omega \sim 20\text{k}\Omega$, 测量电压在 2000kV 以下, 此型分压器结构简单, 价廉, 有良好的测量性能, 因而被广泛使用。

电阻分压器的测量误差, 主要是由于存在对地电容的影响。如果分压器接近地平面, 则垂直分压器的总对地电容值可按垂直导体的电容值来求得:

$$C = \frac{111l}{2\ln \frac{l}{r} - 1.1} \quad (12-41)$$

式中 l ——分压器高, m;

r ——分压器半径, m。

此电容为分布电容, 见图 12-36(a)。此图中不计及电阻的寄生电感及纵向电容。分压器误差的产生, 是对地电容电流通过电阻而衰减延时。经计算, 求得单位方波响应为:

$$g(t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k e^{-\frac{k^2 \pi^2}{RC} t} \quad (12-42)$$

方波响应时间为:

$$T = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt = RC/6 \quad (12-43)$$

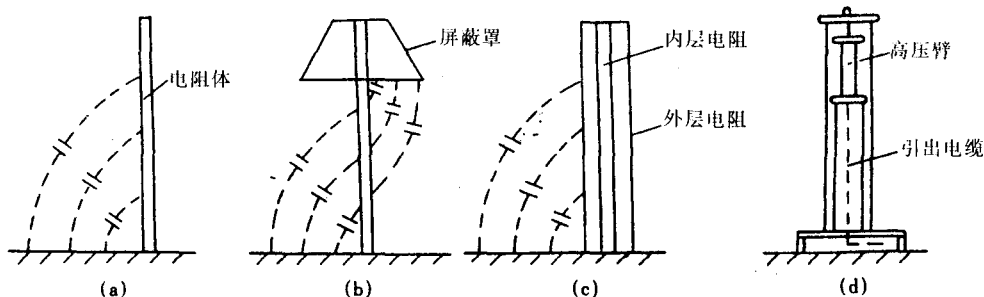


图 12-36 电阻分压器型式

由式(12-43)可见, 响应时间与电阻 R 及对地电容 C 成正比。为减少误差, 可采取不同的措施。图 12-36(b)为电阻体端部加屏蔽罩, 罩与电阻体间的电容补偿对地电容, 使电容电流不通过电阻体, 这是一种较常用的改善方法。图 12-37 为此种屏蔽分压器组成的测量系统。图中 C_1 为屏蔽不完全的电阻体对地电容, C_2 为屏蔽环及高压引线对地电容, L 为到测量点的引线电感, L 与 C_2 将形成振荡, 为阻尼此振荡, 在入端加电阻 R_1 , 若不用屏蔽, 即 C_2 为零, 此

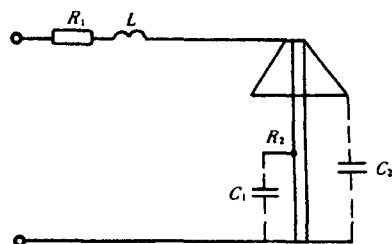


图 12-37 屏蔽分压器组成的测量系统

时 R_1 将不起作用,响应时间决定于 $C_1 R_2$ 值, R_2 为分压器电阻。

电阻分压器也可用电位补偿法来改善性能,结构原理见图 12-36(c)。在分压器电阻外面装一层电阻,形成一个同轴圆柱体,内层为测量电阻,外层为屏蔽电阻,两层电阻上端相连。对电容电流主要通过外层电阻到地,故外层对地电位分布是不均匀的,内外层之间对应部分有电位差,但电压值小,因而流经内层电阻的电容电流很小,避免了测量误差。为取得较好效果,层间要有适当的距离,减少其电容耦合,有时还采用两层屏蔽电阻。此种分压器体积较大,结构复杂,很少使用。

另一种改进方法是用小尺寸电阻体,见图 12-36(d)。此种结构的高压臂电阻体一般是密绕,有尽量小的纵向尺寸,且电阻体离地有一定高度,以减小对地电容,从而降低响应时间。对此种分压器要很好地考虑高压臂的纵向绝缘,由于接地端往上移,要保证外筒与接地电极相应点对高压端的外部绝缘。

电容分压器的高压臂由多台电容器元件串联组成,可用于测量雷电冲击波和操作波,电压可达数兆伏。当利用多台电容器串联时,由于有对地电容的存在,使电容链的电压分布不均匀,上部电压高于下部电压。为使电压均匀分布,可加大电容值或用不同电容值的电容器组成电容链。若用一种规格电容器组成分压器,用加大电容值方法使电容分布较均匀,则要较大的电容值才能达到,因分压器是发生器的电容负载,不希望过大的电容值,因此可考虑用不同规格电容器的方法。理论上,若每级电容器的选取与对地电容分布相匹配,则电压分布为均匀,但因电容器规格不能过多,且电容器的电容值不可避免地有制造公差,不能做到完全匹配,一般是采用几种规格组合,此时电压分布比较均匀,但仍要考虑电容器元件可能产生不均的过电压。电容分压器低压臂的参数按分压比选择,由于高压臂对地电容的存在,其工作电容难以准确确定。对低压臂元件及结构均要很好考虑,注意低压臂电感的响应,很小的电感就会引起波前部分的强烈振荡。此外,电容分压器的低压回路不可能完全匹配,会有折反射而产生误差。

并联阻容分压器是电容分压器的改进型式。理论上分析,电容器有泄漏电阻存在,在全波冲击的波前部分(高频),电压按电容分布,而波尾部分则按电阻分布,若高低压臂的电阻比值与电容比值不同,则会产生误差,因此高低压臂应选用相同介质电容器,才能保证泄漏电阻的一致,实际上这是难以达到的。电容分压器是处于直流电场中,在发生器充电过程中会有静电感应,而并联分压器可避免此影响。此外,低压测量回路可按电阻分压器匹配,末端没有反射。从改进性能来看,较小的并联电阻效果较好,但它是发生器波尾电阻的一部分,因此要适当选择。

由于电容分压器的串联元件中存在寄生电感,因此其响应是振荡型响应。为改善此响应,发展了串联式阻容分压器,即在电容回路中串联电阻来阻尼振荡,此串联电阻放在电容器的内部。要完全阻尼,就要有较大的阻尼电阻,会有较大的响应时间,为减小响应时间,可取较小的电阻,允许响应波有不大的上冲或振荡,此即低电阻阻尼电容分压器。在此种分压器中,低压臂应尽量减少电感,可不用电阻,仅有电容,而高频下电容为低阻抗,减少响应上的振荡。

3 低压测量回路

分压器的低压臂输出,要用同轴电缆引到测量仪器。由于电缆的接入,若端部匹配不正确,则可能产生测量误差。测量电缆是有分布参数的均匀长线,若不考虑损耗, L_0 与 C_0 是单位长度电感和电容,则波在电缆中的传播速度 $V = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$, 在架空线的速度为光速 $V = 3 \times 10^8 \text{m/s}$, 而电缆中的速度约为架空线的一半。电缆端若接有波阻抗匹配,则行波在终端没有反射,若匹配阻抗大于或小于波阻抗,则产生正或负反射,因而产生误差。

电阻分压器与电缆的配合线路见图 12-38。在 u_1 投入瞬间,电缆入口端有 u_2 , 而电缆其他部分

及末端无电压。此时低压臂电阻 $R_3 = \frac{R_2 z}{R_2 + z}$, 分压比为 $K = \frac{R_1 + R_3}{R_3}$, 此电压经 $\tau = \frac{L}{V}$ 后到达点 4, 若 $R_4 = z$, 则末端无反射, 电压稳定为 u_2 。若 $R_4 \neq z$, 则产生反射。测量回路的分压比靠 R_2 来调整, 在 $R_4 = z$ 情况下, 当 $R_2 = \infty$, 最小分压比为 $K = \frac{R_1 z}{R_1 + z}$, 若 R_1 过大, 则测量点电压偏小, 若用模拟示波器, 则不利于测量。

电容分压器与电缆的配合线路见图 12-39。设 u_1 为方波, 在加压之初, C_2 相当于与电阻 $(R+z)$ 并联, 电阻不影响点 2 的初始电压, 其电压值为:

$$u_2 = u_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (12-44)$$

点 3 电压为:

$$u_3 = \frac{1}{2} u_2 = u_1 \frac{C_1}{2(C_1 + C_2)} \quad (12-45)$$

分压比为:

$$k_1 = \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1} \quad (12-46)$$

当 u_3 达到点 4, 在初始瞬间, C_4 相当于短路, 而末端接有波阻抗 z , 没有反射, 但当 C_4 充电后, 阻抗变化, 产生反射, 反射波返回点 3 后, 再反射, 经多次反射后, 输出电压稳定, 此时电缆不通过电流, 稳态分压比为:

$$k_2 = \frac{C_1 + C_2 + C_z + C_4}{C_1} \quad (12-47)$$

要使 $k_1 = k_2$, 则应取:

$$C_1 + C_2 = C_z + C_4 \quad (12-48)$$

即使 $t=0$ 时的暂态分压比 k_1 与稳态分压比 k_2 相同, 在暂态到稳态的过程中, 分压比是在不断变化的, 因此不可避免地会产生误差。

从上述电缆接入分压器的波过程分析, 均假定输入为直角波, 而常用的被测波形较缓, 此波形分解为无限多个小直角波, 此系列直角波按一定的延时送到测量系统, 各直角波由于测量电缆的接入而引起的误差不同时出现, 因此一般总的误差不大。

4 测量系统的方波响应测试

测量系统的方波响应可用计算求取, 但因许多寄生参数难以确定, 计算只能给出近似的结果, 可作定性分析, 而比较准确的方法是在测量系统输入端投入接近理想的方波, 直接测量系统的输出, 确定其方波响应。

方波响应测试时对方波源有两个要求, 一是产生的方波前沿要尽可能陡, 二是内阻尽可能小。

按施加方波方法分, 有上升式及下降式方波。上升式是用快速开关将一直流电压突然加入测量系统, 而下降式是将测量系统加上电压, 在电压稳定后用开关在输入端短接截断。显然, 上升式的电源有一定的内阻, 而下降式的内阻为开关接头之间的小电阻。因此用下降式是较好的。

按方波电压高低分, 有低压及高压方波, 低压方波电压幅值约数百伏, 而高压方波为数万伏。

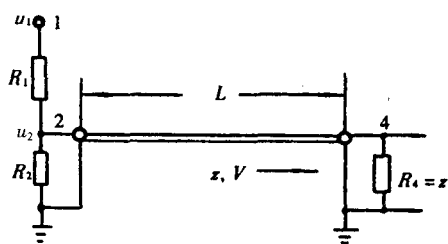


图 12-38 电阻分压器线路

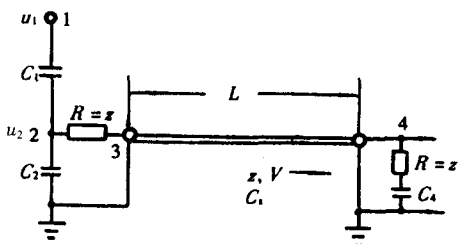


图 12-39 电容分压器线路

低压方波法的方波源所使用的快速开关为水银开关,可产生重复脉冲,其接通时间仅 $1\text{ns}\sim 2\text{ns}$,满足方波测量要求。由于方波源重复动作,因此便于在示波屏上显示。因方波发生器的电压仅几百伏,而分压器的分压比很大,其输出很低,为便于观察,应用高灵敏度的

高频示波器。由于工作电压很低,测试时要注意防止干扰,如地线、电源、空间干扰等。在实际应用上,低压方波法较为方便,具有方波源产品,如国产的 MFD-1 发生器,其标称上升前沿时间小于 1ns ,接上 $2\,000\text{kV}$ 电阻分压器系统的上升陡度约 1.8ns ,见图 12-40(a)。瑞士 40 型方波发生器电压 90V ,重复频率 50Hz ,上升时间小于 5ns ,实测上升时间为 3ns ,见图 12-40(b)。

因低压方波源的体积小,可以随意移动,一般可用三种校正回路,即方环回路、斜线回路和水平回路,见图 12-41。

前两者方波源放在地面,方环回路多一段垂直引线,垂直与水平引线接点处有波阻抗突变,产生局

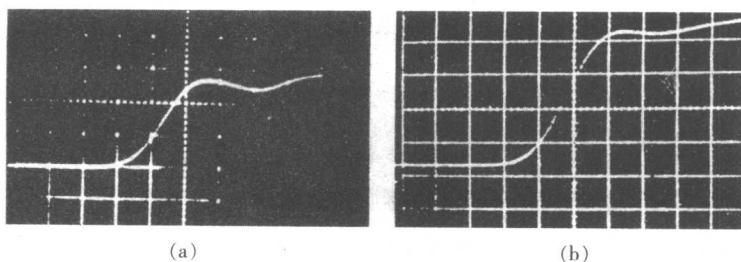


图 12-40 方波波形

(a)MFD-1 低压方波,扫描 $1\text{ns}/\text{div}$ (b)40 型低压方波,扫描 $1\text{ns}/\text{div}$

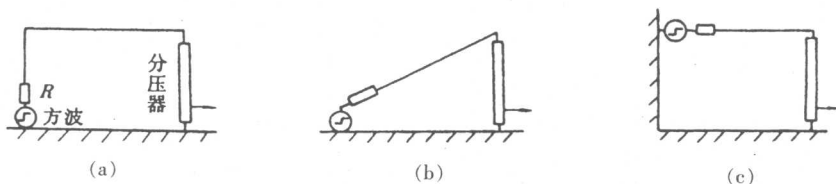


图 12-41 低压方波校正线路

(a)方环回路 (b)斜线回路 (c)水平回路

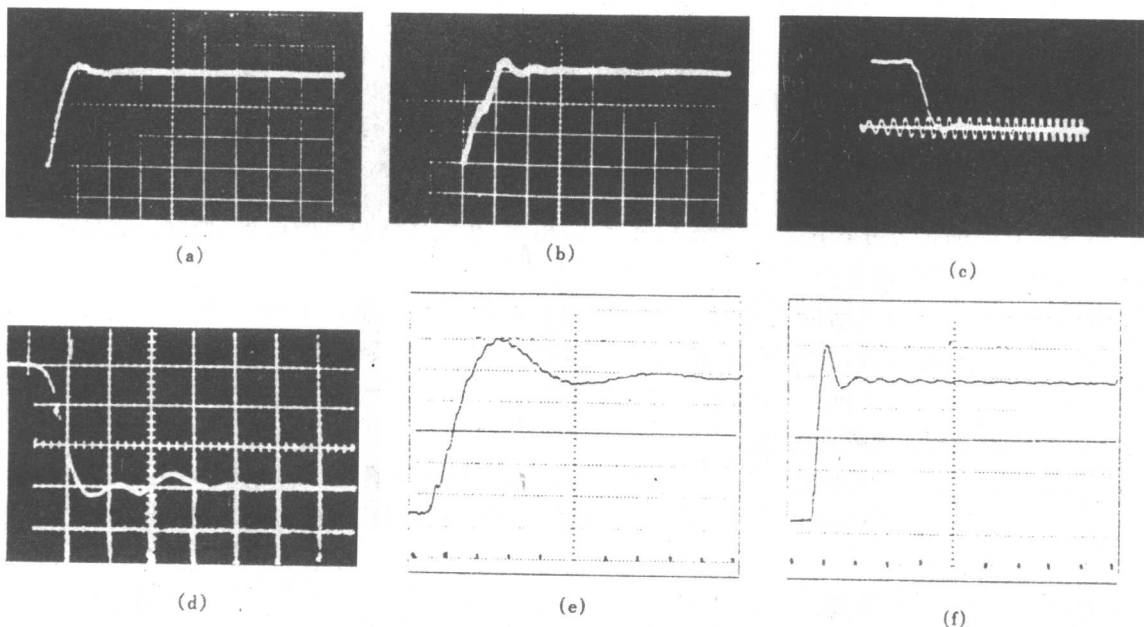


图 12-42 测量系统响应

(a) $2\,000\text{kV}$ 电阻分压器斜引线低压方波响应,扫描 $200\text{ns}/\text{div}$ (b) $2\,000\text{kV}$ 电阻分压器方环引线低压方波响应,扫描 $200\text{ns}/\text{div}$
(c) $2\,000\text{kV}$ 电阻分压器模型 50kV 高压方波响应,时标 12MHz (d) 600kV 电阻分压器低压方波响应,扫描 $20\text{ns}/\text{div}$
(e) $3\,000\text{kV}$ 串联阻容式分压器低压方波响应,扫描 $200\text{ns}/\text{div}$ (f) $3\,000\text{kV}$ 串联阻容式分压器低压方波响应,扫描 $1\mu\text{s}/\text{div}$

部引线振荡,造成响应时间增大。而斜引线的波阻抗是缓变的,局部引线振荡小,响应时间较小。水平回路是将方波发生器放在墙上,离地与分压器等高,方波直接投到测量系统的输入端,此时利用墙壁的金属屏蔽层作接地引线,其阻抗很低,影响不大。

测量系统校正用高压直角波,是按一般冲击回路产生一个冲击电压,加到油间隙上使间隙放电而形成,油间隙就是高速开关。高压直角波发生器没有什么特殊的地方,要注意截断时刻稳定性的控制。由于直角波是毫微秒级,在直角波测量和系统响应试验中,示波器的全屏扫描约 $0.1\mu\text{s}\sim 1\mu\text{s}$,若用模拟示波器,截断时间分散性大则难以观察,因此要稳定。为产生较陡的方波,回路布置应尽可能紧凑。高压方波的测量是比较困难的,需要妥善地解决高压分压器的结构、电缆匹配、分压器与油间隙的布置等问题,要缩短电缆到现象板接线长度和适当选择现象板前的阻尼电阻。由于高压方波法技术复杂,工作量大,目前已很少使用。

图 12-42 为一些分压器方波响应测试的结果。图 12-42(a)~(c)为 2000kV 电阻分压器及其模型用不同方法测量结果,分压器阻值约 $13.6\text{k}\Omega$,图 12-42(a)和图 12-42(b)是低压方波法用斜引线及方环引线测量的响应波形,响应时间分别为 68ns 和 82ns。图 12-42(c)为 2000kV 电阻分压器模型的响应波形,用高压方波测量,其响应时间为 70ns。图 12-42(d)为 600kV 小尺寸电阻体分压器响应,电阻值 $22.4\text{k}\Omega$,响应时间 5.8ns。图 12-42(e)和图 12-42(f)为 3000kV 串联阻容式分压器响应,分压器高压臂电容为 $1440/3\text{pF}$,响应时间 86ns。

第五节 雷电冲击试验

1 试验线路及产品接线

一般冲击试验线路见图 12-43。按试验设备、试品及测量装置的实际布置,可分为主电路、测量电路及截断电路三个基本电路,三个电路的接点在试品端。测量电路应用尽可能短的引线,直接接到试品端,引线仅通过测量电流,可较真实地测量试品的电压,而不包括其他的引线压降。这种接线使截断回路最短,可取得较陡的截波电压。

冲击试验时,由于电压和电流幅值大,要采取措施降低接地系统的阻抗,但此阻抗不能为零,因此整个接地系统均处在不同的电位,要选择一个参考接地点。在冲击试验回路,一般将试品处与接地系统相联,取为参考接地点,测量回路与截断回路均接于此点。

变压器雷电冲击试验时,冲击波分别施加到变压器的每一个出线端,除加压端子外,非被试相、被试相的非被试绕组和被试绕组的非被试端子(即全部非被试端子)均应直接或通过小的测量分流器(电阻)接地。图 12-44 是几种典型的变压器试验接线。图 12-44(a)为 YNyn0d5 接线高压 A

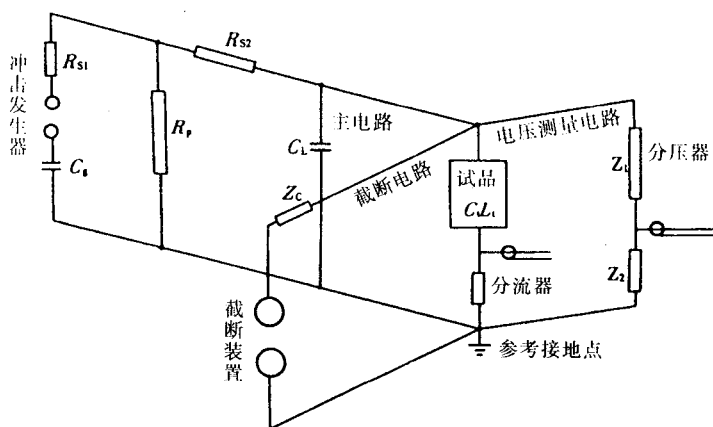


图 12-43 雷电冲击试验线路

C_0 —发生器电容 C_L —负荷电容 C_1 —试品等值电容 L_1 —试品等值电感
 R_{S1} —内部波前电阻 R_{S2} —外部波前电阻 R_p —波尾电阻
 Z_c —截断电路附加阻抗 Z_1 —分压器高压臂 Z_2 —分压器低压臂

相试验,B、C 直接接地,而中点通过分流器 r 接地。中压和低压绕组及中压中点端均连接在一起再经分流器接地。B、C 端也可不直接接地而与中点端相联,但此接线不太方便。图 12-44 (b) 为 Dyn11 接线 A 相试验,A 端加压,B、C 经分流器接地。此时电压加在 A 相首端和 C 相末端,同时试验两相,试品阻抗较低。图 12-44 (c) 为三相自耦变压器接线, A_m 与中点联结经分流器接地,B、C 也可不直接接地而与中点联结。图 12-44(d) 为中点不引出时单相(A 相)试验接线,B、C 联接后接分流器,作中点电流示伤,此时实际上是 A 相与 B、C 相并联后串联,并非由 A 相全部承担试验电压。图 12-44(e)

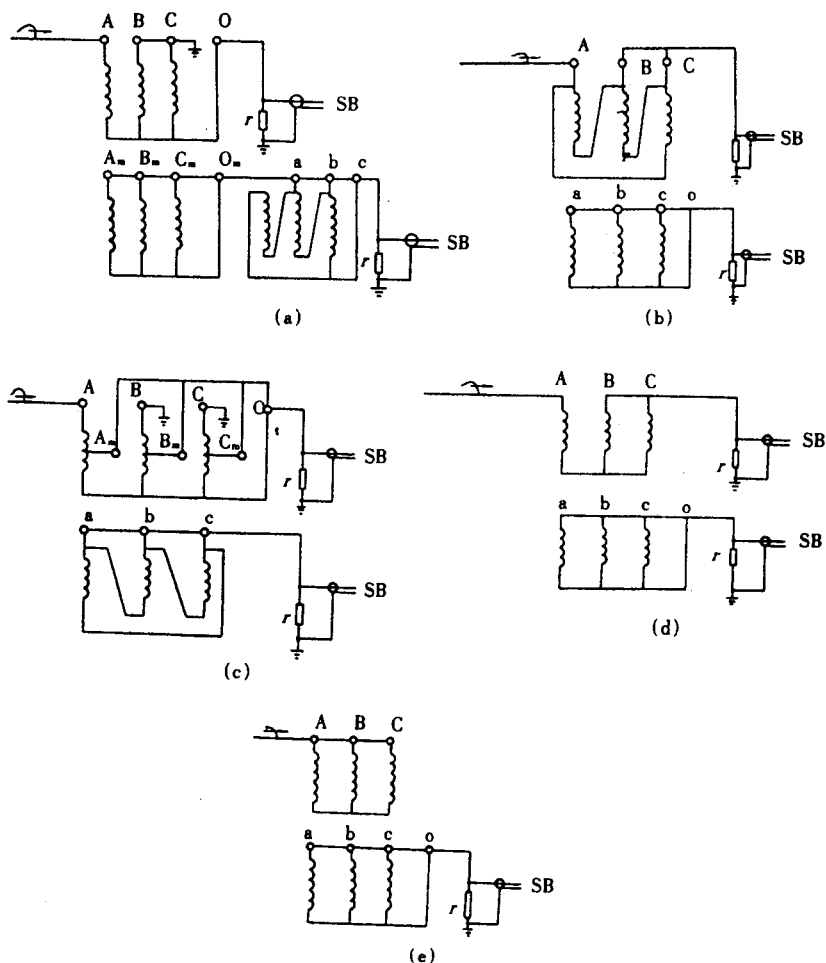


图 12-44 雷电冲击试验时变压器接线

SB—示波器

为 Yyn0 中点不引出时中点试验(三相进波)接线,此时无中点电流示伤。

2 试验准备、调波及产品试验

2.1 试验前的准备

产品施加冲击电压试验前,要做如下的准备工作:

(1) 做好技术准备,查清产品技术条件、试验鉴定大纲、有效的试验标准,重大产品要编制试验大纲。

(2) 试品及试验设备要正确接线,要保证引线对各接地部分的绝缘距离,以免在试验过程中出现不应有的绝缘放电。若用球极测量,要注意引线对球隙电场的影响。

(3) 升高座、连管、充油套管及有单独油室的分接开关等可能储存气体的部位,均应充分放气。

(4) 检查套管及产品的油位,确认产品油位正常。

(5) 选择分接开关位置,并用万用表检查分接开关的导通状态,保证接触良好。

(6) 检查套管是否装有电流互感器,最好将互感器接线盒端子全部短接接地。

(7) 若套管有测量屏时,应将测量屏接地。

(8) 要做好试验的安全措施,要有信号灯、指示牌、围栏等。必要时,要指定专人观察产品、设备

及试区,以便及时发现异常情况,并防止人员误入试区。

2.2 波形调整

试验时,首先要根据试品的参数(主要是产品的电压及容量)及技术条件选择冲击发生器的级数及串、并联联结。考虑发生器同步及安全等因素,发生器的运行电压尽可能低些,例如在 60% 额定电压下,发生器的效率可估计在 60%~80%。实际上在主电容较大、用高效率回路对一般产品试验时效率约在 90%,如果波形上冲较大则会超过 100%。

发生器运行级数决定后,按波形的简化计算决定波前及波尾电阻。一般波尾电阻变化不大,主要是波前电阻,此电阻尽可能在设备内部均匀分布。应特别指出在各级电阻元件的电阻值不相等时,大阻值有较高的电压及消耗更多的能量,要考虑保证其绝缘强度及热稳定性,此问题往往被试验人员忽视,从而引起电阻损坏。

录取波形后,根据实际波形调整电阻参数。若回路电感过大,在试品电容较大时,全波波峰处的上冲或振荡可能大于 5%,此时应增加波前电阻,而电阻的增加会加长波前时间,大于 $1.56\mu\text{s}$,此时应限制上冲不超过 10%而取得尽可能陡的波前。由于变压器是电感、电容负载,波尾时有振荡,要用慢扫描观察记录此波形,其反峰值应不大于截波冲击峰值的 30%,若大于此值则要增大发生器主电容或减小波尾电阻。

在试品电感特别小时,应用前述方法来调整波尾时间,图 12-45(a)为 YNd11 低压 a 端试验接线,低压 b、c 端及高压 A、B、C 端均通过电阻 R 接地,高压 C 端也可以直接接地,低压 b、c 端联结后通过一个电阻接地,此时 C 相为短路状态。图 12-45(b)为 Yd11 高压 A 端试验时接线。由于 B、C 端电位相等,可并联后通过一个电阻接地,而低压三相端子 a、b、c 分别用 R 接地,低压 c 端亦可直接接地,但因低压为非试绕组,当三相均用电阻接地,则改变高压试验相时低压不用改变接线,比较方便。图 12-45(c)为自耦变压器高压 A 端(实线)或中压 A_m (虚线)试验接线,被试绕组的非试端子及非试绕组通过电阻接地。图 12-45(d)是自耦低压端试验接线,非试绕组 A、 A_m 端均用电阻接地。若支撑法尚不能满足半值时间要求,则可结合图 12-18 线路同时考虑。

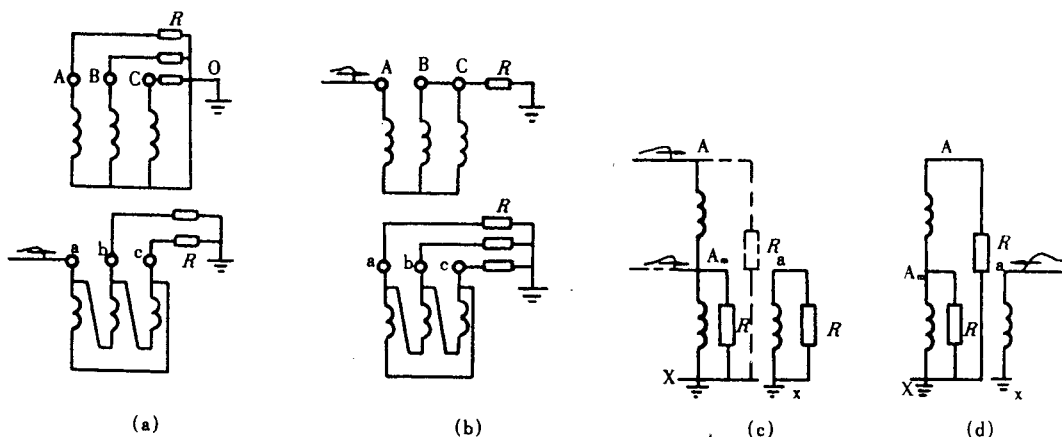


图 12-45 用附加电阻增大半值时间的线路

截波试验时,主要是调整截断时间和过零系数。对单球不可控截断装置,截断时间由拉长波前和提高电压来决定,波前时间一般要大于 $3\mu\text{s}$,施加电压高于试验电压的 10%~15%,截断时间约控制在 $2.5\mu\text{s}$ 。由于截断时间的分散性,多次试验中有些会小于 $2.5\mu\text{s}$,但不应小于 $2\mu\text{s}$ 。对可控截断装置,截断时间由触发装置控制,一般可在 $3\mu\text{s}$ ~ $4\mu\text{s}$,应注意的是,截断时间的不同对绕组波过程会有影响,从而影响绝缘,要尽可能加以考虑。

截波的过零系数主要决定于回路尺寸和试品参数。对于高电压大容量产品试验,过零系数容易达到标准,甚至大于 0.35,此时应在图 12-43 中加入 Z_c ,此电阻一般小于 50Ω 。

2.3 产品试验

对于变压器内部油纸绝缘结构,绝缘强度不受电压极性影响,而外绝缘空气间隙强度与电压极性有关,正极性低而负极性高。产品的冲击试验主要考核内绝缘,为使试验顺利进行,不受外绝缘影响,标准规定冲击试验电压均选用负极性。

产品试验的第一步是校准电压,若用峰值电压表,可在约 50%试验电压下校正充电电压与输出电压关系,施加 100%电压时仍用峰值电压表测量。当用球极校正,要在低于 50%~60%电压下校三点,作出曲线,以确定不同施加电压下的充电电压,试验时按此曲线加压。

关于试验程序,当用可控截断装置时,其顺序为低压全波,100%全波一次,低压截波,100%截波二次,100%全波二次。由于全截波交替试验,示伤元件不能更换,要适当选择分流器电阻值。不同项目试验时,要变换示波器的衰减器,也要变换扫描时间,才能完成试验。若用不可控截断装置,因全截波要用不同波形,要调整发生器,所以不能交替试验,只能全截波分开进行。

对于冲击试验时分接开关的位置,标准规定若调压范围小于、等于 $\pm 5\%$,则在额定分接位置。若大于 $\pm 5\%$,对于三相变压器或三台单相变压器组,三相分别在最大、额定和最小分接位置进行试验。

额定电压试验时,因大气条件等影响或同步系统调节不当,设备可能失控,在操作人员准备不充分下产生冲击波,若用模拟高压示波器观察、人工按相机记录时,此次试验无法记录。因此当 100%电压试验时,试验人员要全神贯注,尽可能在设备失控时也能观察到波形,有经验的人员可根据观察来判断波形是否有大的畸变,产品是否有故障,尽可能减少设备失控的影响。若用数字示波器,因其有自动记录功能,可避免设备失控的影响。

在试验过程中,当发现有异常时,要停止试验,冲洗照片或打印波形,经分析后再决定是否继续其后的试验。当判断有故障时,往往出现两种意见,一种是中止试验,因再经多次试验后,故障发展,从而影响产品的修复。另一种意见是怕故障不明显,不易检查,器身吊检后无法处理,因此要多次加压,扩大故障,便于查找故障部位。应如何处理,要根据经验来决定,原则是能发现故障点,尽可能减少试验次数。

重大的高电压产品试验时,要加强试区的观察,一方面要避免非试验人员误入试区,另一方面要观察是否有引线、设备等不应有的外绝缘放电,以免误判产品质量状况。

第六节 雷电冲击试验故障检测

1 故障判断

变压器产品冲击试验时,是否通过试验或出现故障,主要是根据所记录的电压电流波形图来判断,而监听放电声、检测超声波及工频复试等可作为辅助方法。

产品施加冲击电压时,可检测端子电压及试品回路中各部分电流,对取得的电压及电流波形图进行分析,即可判断产品绝缘状况,此法是目前采用的主要方法。

产品试验时,若无内部故障,只会听到设备的放电声。当有故障时,油浸变压器产品内部或大小地会有发闷的声音,容易与设备的放电声相区别,注意监听有助于故障判断。

若产品产生故障,除有可听到的声音外,还有超声波存在,油浸变压器在油箱壁上检测超声波可判断故障及进行故障定位,这是一种主要的辅助方法。

对于干式变压器,若有放电可见到有弧光,外部观察可判断是否有放电。

产品冲击试验后,可进行工频耐压和感应等项目的复试,这有助于判断冲击试验是否通过。但

应指出,由于产品在冲击和工频电压作用下的绝缘特性相差甚远,有些冲击故障用工频电压可以检查,如某些主绝缘、套管等。而有些故障工频是不好检查的,如某些匝间故障、冲击电位及梯度特别高的部位故障等。因而,冲击与工频试验情况要各自判断,不能因工频复试通过来确定通过了冲击试验,也不能因工频复试不通过而判定冲击存在故障。

试验标准中规定的试验顺序是全波一次,截波两次,全波两次。这是考虑到截波试验波形记录易受干扰,试验难度比全波大,唯恐截波试验结果判断困难,因此用后两次全波来检查截波试验情况。但实践表明,全、截波的绕组电位分布及梯度分布各不相同,有些绝缘部位可相互考核,但多数情况下是不能考核的,应分别用全、截波各自的试验结果来判断。

2 电气法故障检测

产品施加冲击电压时,试验回路中不同点出现电流和电压,电气法就是检测这些电流和电压,记录 50%(降低电压)和 100% 电压下的波形,将波形直接对比或求取传递函数后进行对比,来判断产品是否通过冲击试验。

常用的检测线路见图 12-46,高压端加压,用分压器记录入波电压,被试绕组非试端通过分流器 R_1 接地,记录通过非试端的中点电流 i ,非试绕组 ax 短接,经分流器 R_2 接地,记录传递电流。图 12-46 给出了变压器绕组的分布参数电路,有高压、低压绕组电感 L_1 和 L_2 ,高压绕组纵向电容 C_1 和对地电容 C_2 ,高低压绕组间电容 C_3 (图 12-46 未画出低压绕组的纵向及对地电容)。当施加全波冲击时,通过电感 L_1 有电流 i_1 ,通过 C_1 有电流 i_2 ,由于是分布参数电路,绕组中除 i_1 、 i_2 外,尚产生振荡,通过末端有振荡电流分量 i_3 ,因此分流器 R_1 中是通过三种电流的总和,见图 12-47。其中 i_1 时间较长,而 i_2 、 i_3 衰减较快。此图

主要表示中点电流初始的振荡情况,实际上,此振荡过程很快就完结,主要是记录电感电流 i_1 。低压绕组中的电流,主要是通过电容 C_3 传递产生,是一振荡电流,当高压绕组振荡过程减弱后,此电流也减弱,因此通过 R_2 电流衰减快,时间较短。当施加截波电压时,相当于在截断时刻加上一反极性的冲击电压,通过分流器的电流是正反脉冲产生电流的叠加。若截断时间短,电感电流 i_1 得不到发展,中点电流及电容传递电流均为时间较短的振荡电流。若高压绕组各点电压为 u ,通过 C_3 到低压绕组的电容传递电流为 $C_3 \frac{du}{dt}$,由于电压起始点和截断点 $\frac{du}{dt}$ 相反,因此传递电流的电压起动点和截断点有相反的极性。

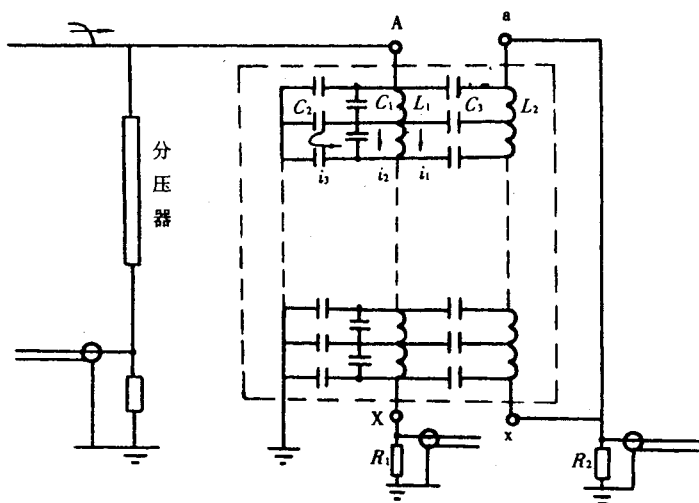


图 12-46 电气法检测故障线路

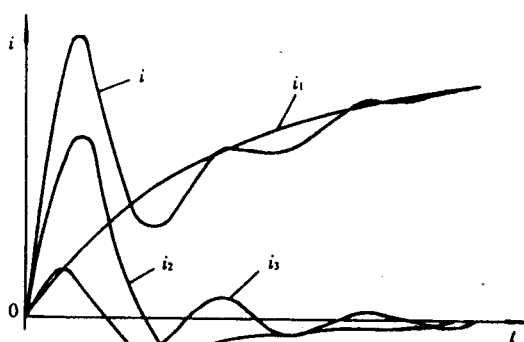


图 12-47 中点电流

全波试验时,电压的记录时间为 $20\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$,中点电流为 $100\mu\text{s}\sim 1\,000\mu\text{s}$,电容传递电流为 $50\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$ 。截波试验时,电压记录时间为 $10\mu\text{s}\sim 25\mu\text{s}$,两种电流为 $10\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$ 。

为了更好地判断变压器的绝缘情况,一般均要求记录三个波形。就检测灵敏度而言,入波电压灵敏度较低,它主要是指指示主绝缘的对地放电,若为局部放电,则反应较弱或不能指示。而中点电流和电容传递电流则可反映局部故障,根据故障不同性质,这两种电流检测会有不同的灵敏度。

3 电气法故障检测的实例分析

本部分结合一些变压器试验检测的实例作如下分析。

3.1 全波高压端部对地放电

图 12-48 为 25MVA/110kV 变压器高压引线对升高座放电;图 12-49 为 120MVA/220kV 变压器 B_m 引线对地屏放电;图 12-50 为 ZQSC-3360/35 干式变压器故障。图 12-51 为 S9-5000/66 变压器中点故障。

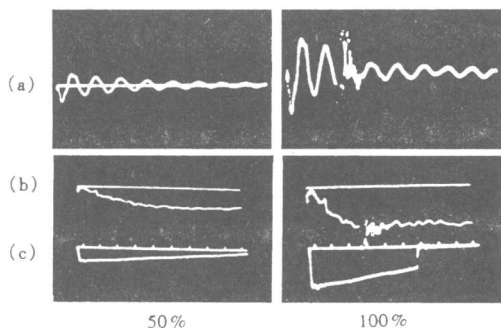


图 12-48 25MVA/110kV 变压器高压引线对升高座放电

(a)电容传递电流 扫描 $100\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $100\mu\text{s}$ (c)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$

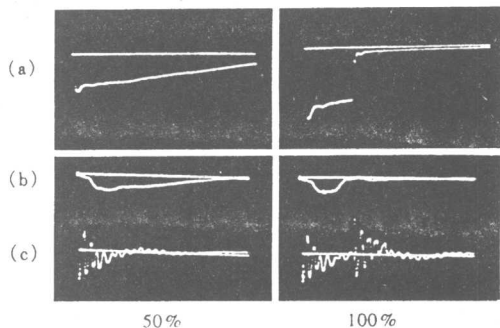


图 12-49 120MVA/220kV 变压器 B_m 引线对地屏放电

(a)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $250\mu\text{s}$ (c)电容传递电流 扫描 $50\mu\text{s}$

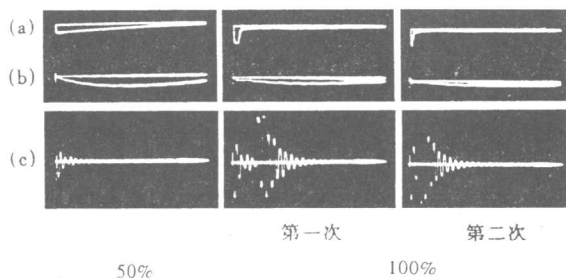


图 12-50 ZQSC-3360/35 干式变压器故障

(a)施加电压 扫描 $100\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $250\mu\text{s}$ (c)电容传递电流 扫描 $25\mu\text{s}$

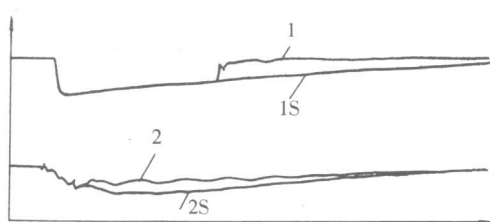


图 12-51 S9-5000/66 变压器中点故障

1—100%故障电压 } $5\mu\text{s}/\text{格}$
1S—100%正常电压 }
2—100%故障中点电流 } $25\mu\text{s}/\text{格}$
2S—100%正常中点电流 }

由于是施加电压端对地放电,电压由全波变为截波。全波电压出现截断,中点电流中的电感电流分量得不到发展,故障亦使电容传递电流畸变。

3.2 全波高压绕组中部对地放电

图 12-52 为 13MVA/132kV 变压器分接引线对开关均压环放电;图 12-53 为 SC-500/10 干式变压器故障。

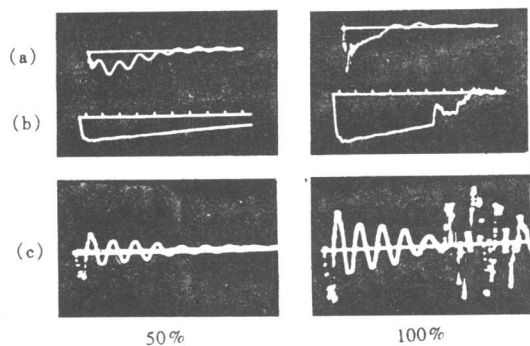


图 12-52 13MVA/132kV 变压器分接引线
对开关均压环放电

(a)中点电流 扫描 1000 μ s (b)施加电压 扫描 50 μ s
(c)电容传递电流 扫描 50 μ s

图 12-52 产品中调压,故障时绕组一半对地放电,电压突然降落,但不到零,然后较快到零,中点电流时间缩短,波形畸变,电容传递电流波形亦变化。图 12-53 中电压波长缩短较大,但不立即为零,中点电流没有发展,可能是绕组中部对地或对低压绕组放电。

3.3 全波绕组纵绝缘贯通性放电

图 12-54 为 150MVA/220kV 变压器高压出线根部放电 (A 相); 图 12-55 为 50MVA/35kV 变压器纵绝缘放电; 图 12-56 为 380MVA/235kV 变压器故障。

这类故障主要沿绕组或撑条形成贯通性故障。记录电压波形突然截断或较缓慢地到零,中点

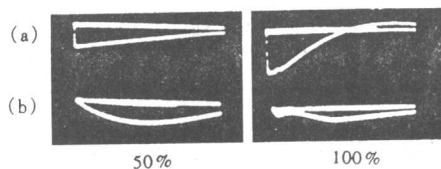


图 12-53 SC-500/10 干式变压器故障

(a)施加电压 扫描 100 μ s
(b)中点电流 扫描 250 μ s

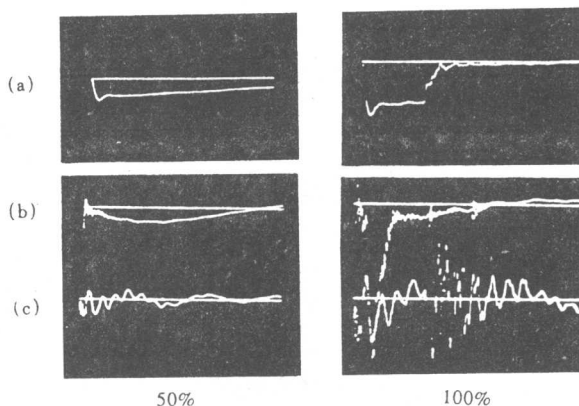


图 12-54 150MVA/220kV 变压器高压出线
根部放电

(a)施加电压 扫描 50 μ s (b)中点电流 扫描 250 μ s
(c)电容传递电流 扫描 50 μ s

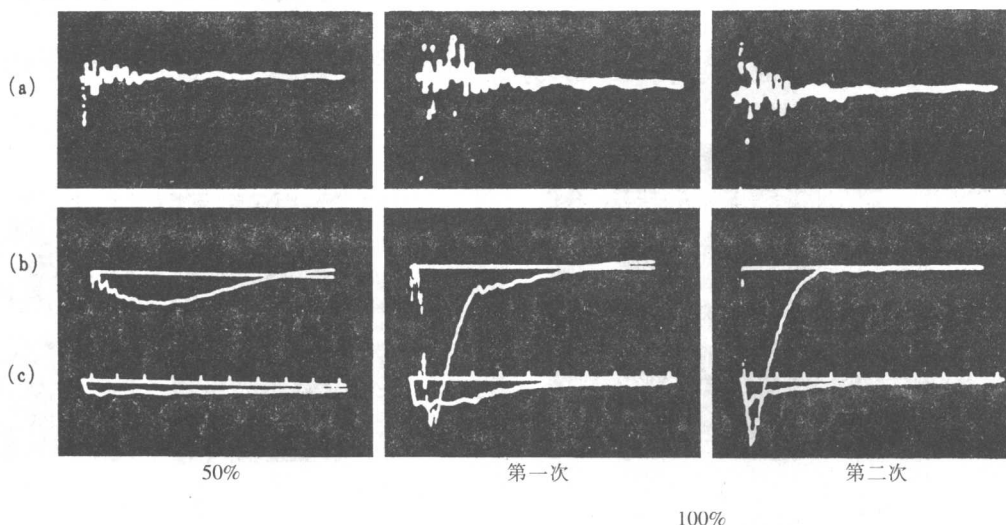


图 12-55 50MVA/35kV 变压器绕组纵绝缘放电

(a)电容传递电流 扫描 100 μ s (b)中点电流 扫描 250 μ s (c)施加电压 扫描 50 μ s

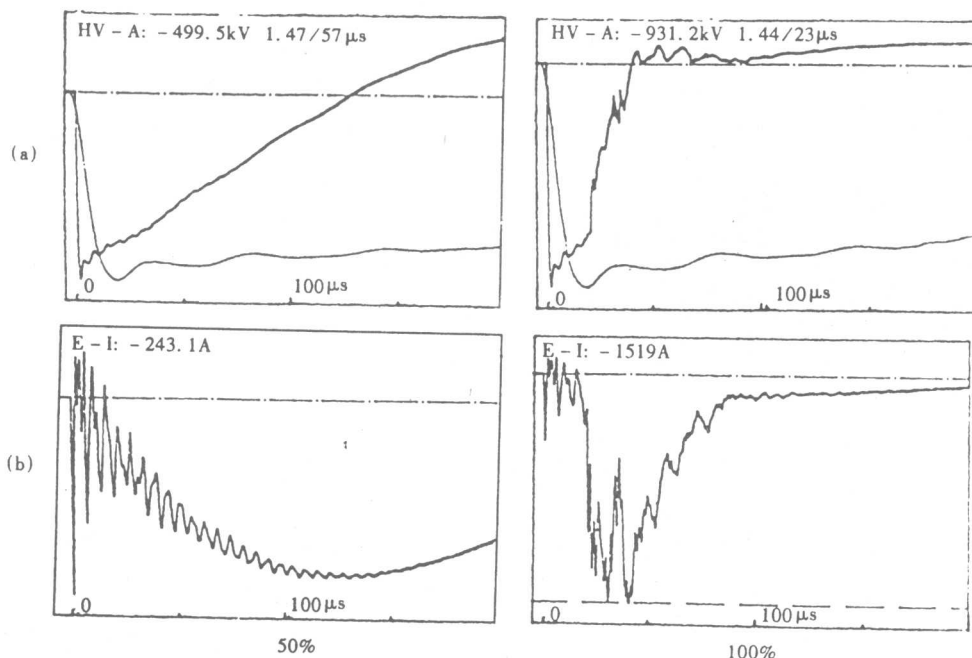


图 12-56 380MVA/235kV 变压器故障

(a)施加电压 快扫描 10 μ s,慢扫描如图示 (b)中点电流 扫描如图示

电流幅值有明显的升高,然后很快下降,持续时间缩短。电容传递电流变化明显,截断处有振荡。

3.4 全波绕组纵绝缘局部击穿放电

图 12-57 为 13MVA/132kV 变压器调压绕组纵绝缘放电;图 12-58 为 250MVA/500kV 变压器绕组沿撑条放电;图 12-59 为 120MVA/220kV 变压器高压绕组段间放电;图 12-60 为 150MVA/220kV 变压器故障;图 12-61 为 SCB-800/10 干式变压器故障;图 12-62 为

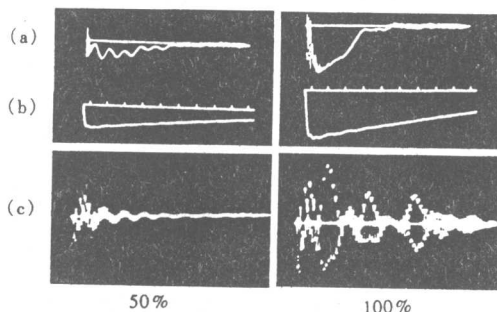


图 12-57 13MVA/132kV 变压器调压绕组纵绝缘放电

(a)中点电流 扫描 1000 μ s (b)施加电压 扫描 50 μ s
(c)电容传递电流 扫描 100 μ s

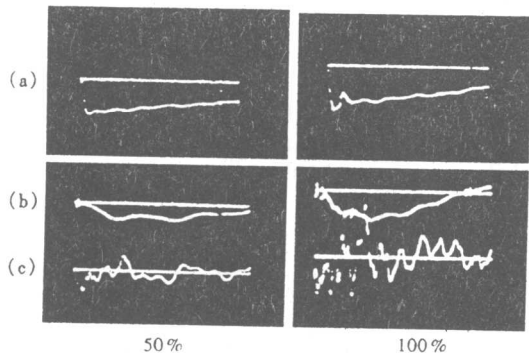


图 12-58 250MVA/500kV 变压器绕组沿撑条放电

(a)施加电压 (b)中点电流 (c)电容传递电流

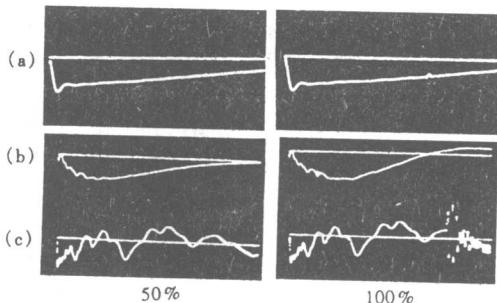


图 12-59 120MVA/220kV 变压器高压绕组段间放电

(a)施加电压 扫描 50 μ s (b)中点电流 扫描 250 μ s
(c)电容传递电流 扫描 50 μ s

S11-630/10 变压器故障。

这类故障是绕组局部击穿放电,而不是贯通性放电,主要有沿绕组局部放电,沿撑条局部放电,出线端根部放电产生的绕组局部放电,绕组段、匝间放电等。由于局部击穿放电程度不同,电压电流示波图变化情况也各不相同。电压波可能没有明显变化、有局部跳动或波尾缩短,中点电流可能变化不明显、有高频振荡、波形缩短和幅值增大,电容传递电流一般在故障瞬间出现高频振荡,产生波形畸变。波形变化的主要特征应该是电压时间缩短、中点电流时间缩短及电流幅值增大。

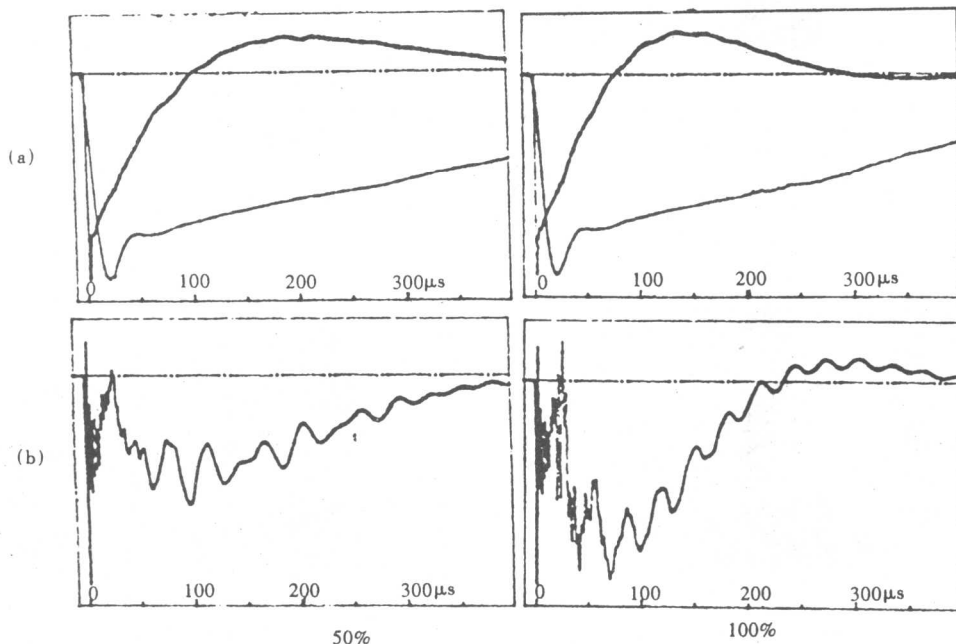


图 12-60 150MVA/220kV 变压器故障

(a)施加电压 快扫描 10μs,慢扫描如图示 (b)中点电流 扫描如图示

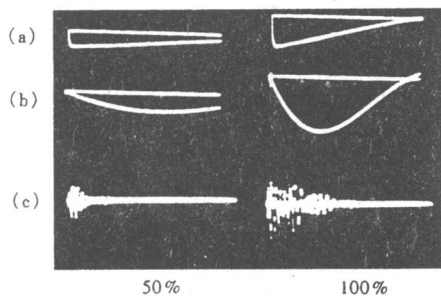


图 12-61 SCB-800/10 干式变压器故障

(a)施加电压 扫描 100μs (b)中点电流 扫描 250μs
(c)电容传递电流 扫描 25μs

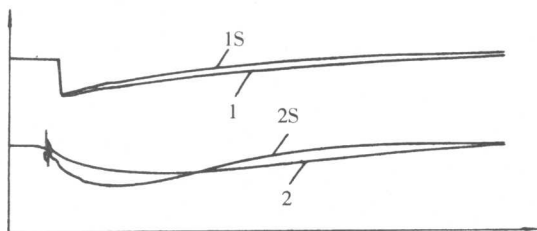
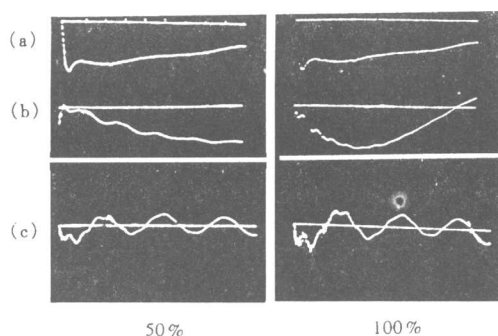


图 12-62 S11-630/10 变压器故障

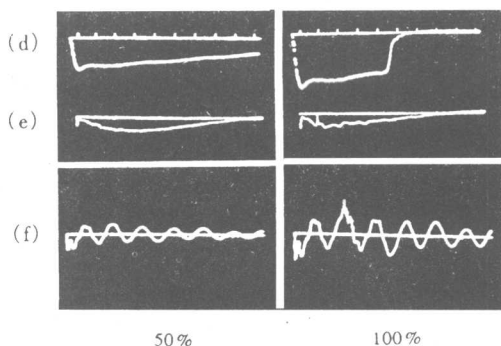
1—50%电压 } 10μs/格
1S—100%电压 }
2—50%中点电流 } 25μs/格
2S—100%中点电流 }

3.5 全波高压部分通过绝缘件击穿

图 12-63 为 167MVA/500kV 变压器中压绕组并联电容棒击穿;图 12-64 为 90MVA/220kV 变压器调压绕组引线沿木压板对铁心放电;图 12-65 为 160MVA/220kV 变压器分接引线在木夹件处击穿。



电容棒局部放电



电容棒击穿

图 12-63 167MVA/500kV 变压器中压绕组并联电容棒局部放电和击穿

(a)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $100\mu\text{s}$ (50%) 扫描 $250\mu\text{s}$ (100%) (c)电容传递电流 扫描 $50\mu\text{s}$
(d)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$ (e)中点电流 扫描 $250\mu\text{s}$ (f)电容传递电流 扫描 $100\mu\text{s}$

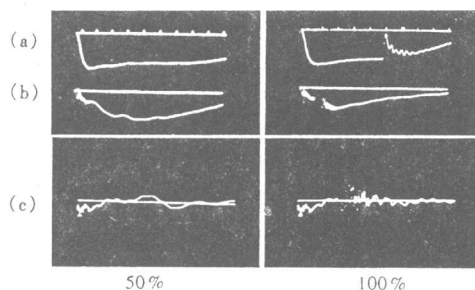


图 12-64 90MVA/220kV 变压器调压绕组引线
沿木板对铁心放电

(a)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $250\mu\text{s}$
(c)电容传递电流 扫描 $100\mu\text{s}$

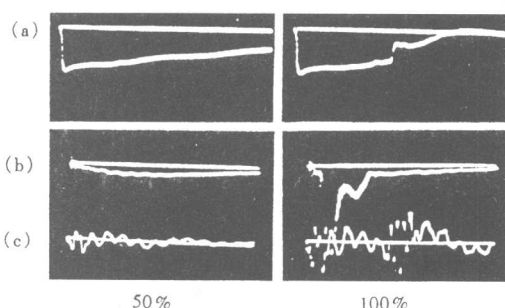


图 12-65 160MVA/220kV 变压器分接引线
在木夹件处击穿

(a)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $250\mu\text{s}$
(c)电容传递电流 扫描 $100\mu\text{s}$

这类故障也属于高压端部对地放电,但其放电通道不是油隙,而是绝缘件,如通过木夹件、撑条内部等。出现此类故障时,电压波截断(有时不直接降至零),若放电打到绕组末端,则中点电流增大,若对其他接地部分放电,中点电流得不到发展,幅值降低,波长缩短,放电瞬间中点电流及电容传递电流有高频振荡,波形畸变。

3.6 全波高低压绕组间放电

图 12-66 为 SCB9-630/10 干式变压器高低压绕组间放电;图 12-67 为 120MVA/220kV 变压器 B_m 引线对低压绕组放电;图 12-68 为 150MVA/220kV 变压器高压对低压绕组放电。

这类故障是高压绕组直接对低压绕组放电,示波图最大特点是电容传递电流突然上升,往往使记录仪器超屏或限幅。由于其变化速度很快,甚至记录很困难。故障的电压波截断,中点电流波形畸变,波长缩短。

图 12-66 是将 50%(正常)及 100%(故障)电压下的电压波形、电容传递电流及中点电流波形放在一张图上,可以看到放电截断前的波形是一致的,放电后则电压波形截断,电容传递电流增大限幅,中点电流截断后出现高频振荡,且得不到发展,很快到零。

3.7 全波局部放电

图 12-69 为 SC-500/10 干式变压器故障;图 12-70 为 SC-500/10 干式变压器故障;图 12-71

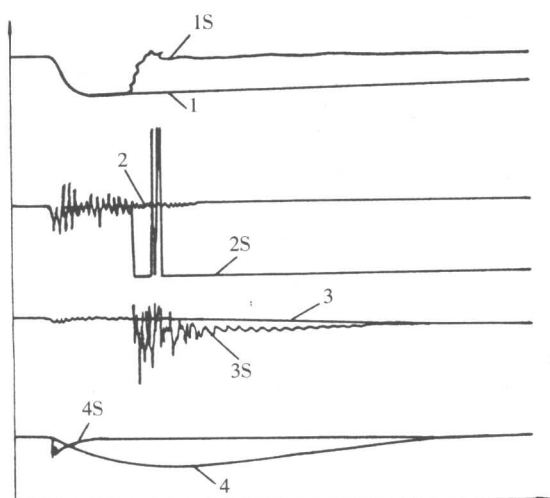


图 12-66 SCB9-630/10 干式变压器
高低压绕组间放电

1—50%电压
1S—100%电压
2—50%电容传递电流
2S—100%电容传递电流
3—50%中点电流
3S—100%中点电流
4—50%中点电流
4S—100%中点电流

1 $\mu\text{s}/\text{格}$
25 $\mu\text{s}/\text{格}$

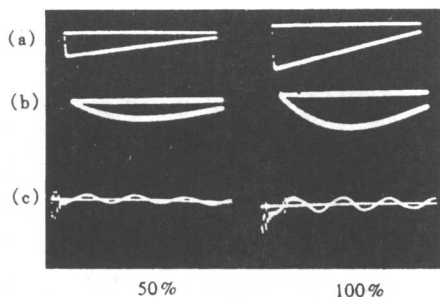


图 12-69 SC-500/10 干式变压器故障

(a)施加电压 扫描 100 μs
(b)中点电流 扫描 250 μs
(c)电容传递电流 扫描 50 μs

为 120MVA/220kV 变压器(低压)故障;此外,图 12-63 的局部放电也属此例。

图 12-63 电容棒局部放电图例是经大量试验及吊检所证实,放电部位是明确的。其他图例吊检情况不详,示波图又没有能定性的波形畸变(如电压截断、电压波长缩短、中点电流幅值大增

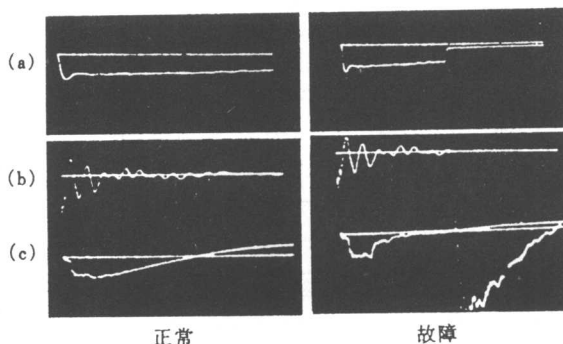


图 12-67 120MVA/220kV 变压器模型
(110kV 中压试验)B_m引线对
低压绕组放电

(a)施加电压 (b)中点电流
(c)电容传递电流

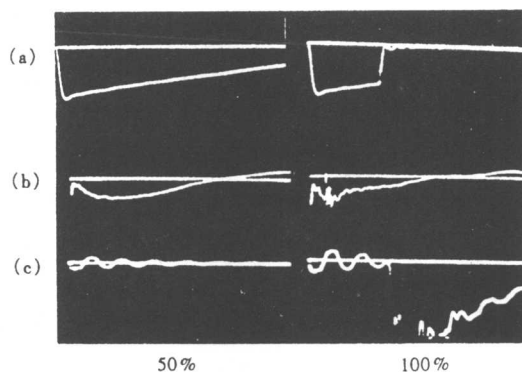


图 12-68 150MVA/220kV 变压器高压对低压
绕组放电

(a)施加电压 扫描 50 μs (b)中点电流 扫描 250 μs
(c)电容传递电流 扫描 50 μs

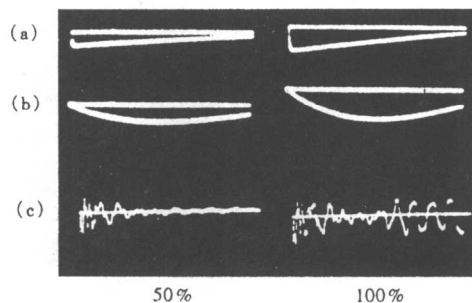


图 12-70 SC-500/10 干式变压器故障

(a)施加电压 扫描 100 μs
(b)中点电流 扫描 250 μs
(c)电容传递电流 扫描 10 μs

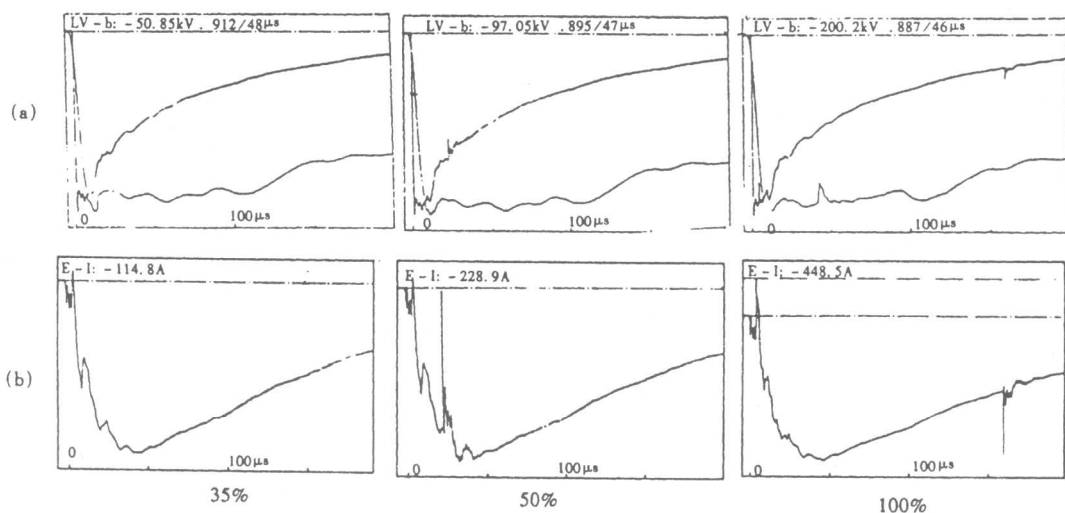


图 12-71 120MVA/220kV 变压器故障

(a)施加电压 快扫描 $10\mu\text{s}$,慢扫描如图示 (b)中点电流 扫描如图示

和波形缩短、电容传递电流突然增大等),仅出现跳动、低幅值的高频振荡,波形畸变不很大。这类示波图说明产品损坏不是很严重,但有局部放电,可能是主绝缘的局部放电,也可能是纵绝缘的局部放电。图 12-70 也可能有非试绕组的故障。

3.8 全波未见故障,处理后复试合格

图 12-72 为 63MVA/220kV 变压器试验波形,其电压电流记录出现局部放电情况,电压后部有振荡,中点电流有 4 处低幅值高频振荡,电容传递电流没有变化。此产品吊心检查未发现故障,经处理后复试合格。

3.9 截波高压端部对地放电

图 12-73 为 360MVA/330kV 自耦变压器过渡套管电木筒外部放电。由于在入口端对地放电,截断回路有所改变,电压波截断后发生变化,中点电流及电容传递电流均畸变,振荡频率变化。

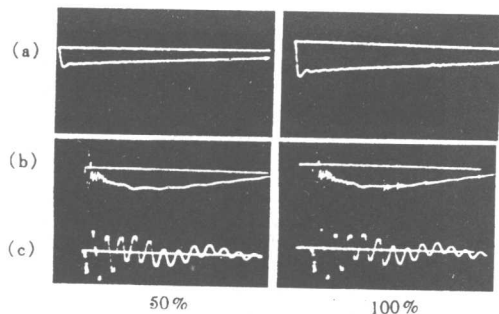


图 12-72 63MVA/220kV 变压器未发现故障,处理后复试合格

(a)施加电压 扫描 $50\mu\text{s}$
(b)中点电流 扫描 $100\mu\text{s}$
(c)电容传递电流 扫描 $50\mu\text{s}$

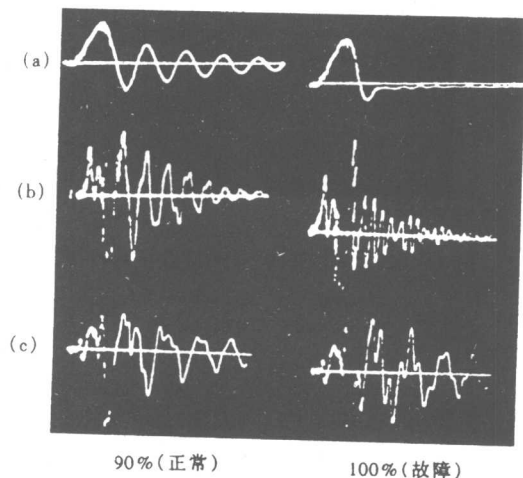


图 12-73 360MVA/330kV 自耦变压器过渡套管电木筒外部放电

(a)施加电压(过零系数 0.7) (b)中点电流
(c)电容传递电流

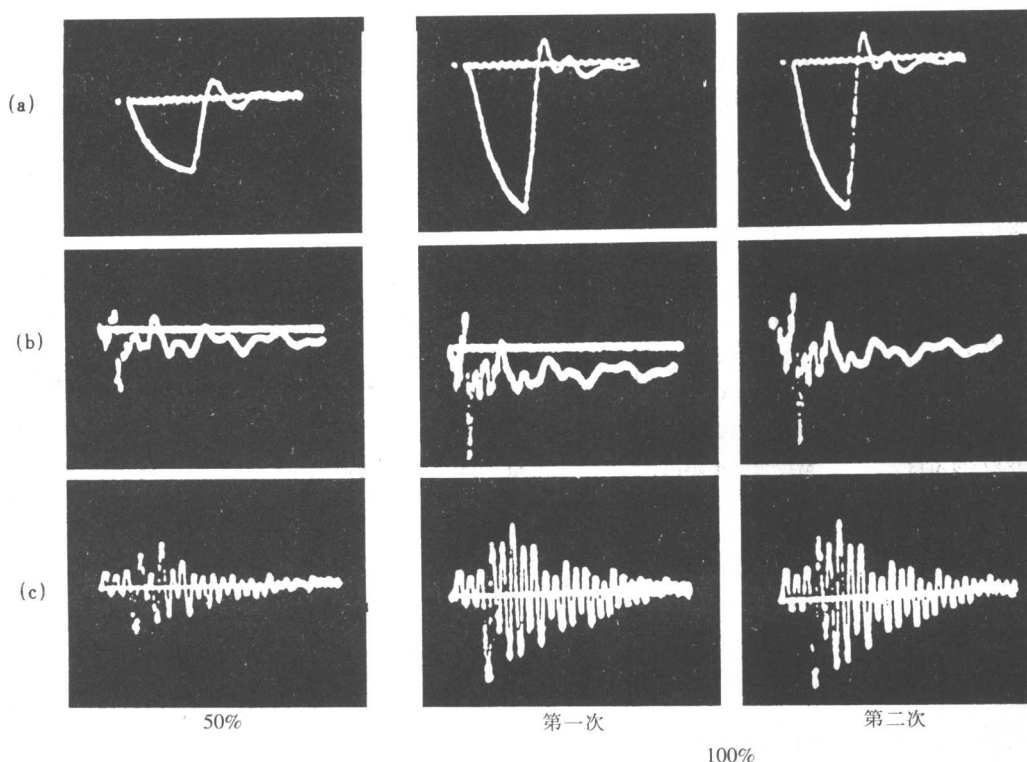


图 12-74 150MVA、220/110/38.5kV 变压器中压撑条放电

(a)施加电压 (b)中点电流 (c)电容传递电流

3.10 截波绕组沿撑条放电

图 12-74 为 150MVA/220kV 变压器中压撑条放电。电压波形截断后变化明显,中点电流及电容传递电流均有变化。

3.11 截波绕组局部击穿放电

图 12-75 为 32MVA/220kV 变压器开关间隙放电。

这类故障是绕组的部分短路放电,波形畸变大小与故障严重程度有关,图例中三个波形均有变化。

3.12 截波非试绕组故障

图 12-76 为 360MVA/330kV 变压器非试低

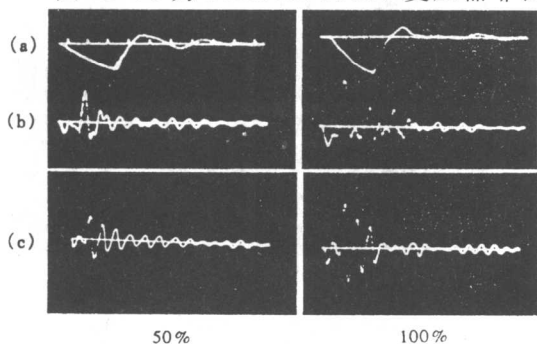


图 12-75 32MVA/220kV 变压器开关间隙放电

(a)施加电压 扫描 $10\mu\text{s}$ (b)中点电流 扫描 $25\mu\text{s}$

(c)电容传递电流 扫描 $25\mu\text{s}$

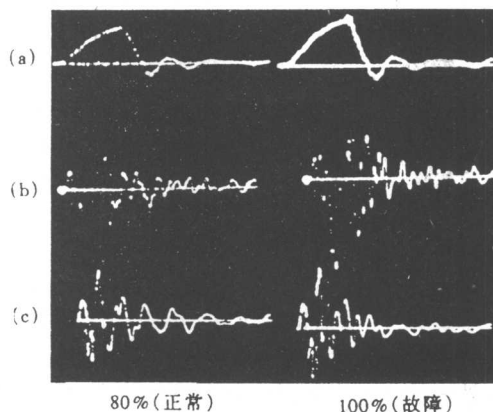


图 12-76 360MVA/330kV 变压器低压绕组
联线对夹件放电

(a)施加电压 (b)中点电流 (c)电容传递电流

压绕联线对夹件放电。在冲击试验中,除被试绕组有电压作用外,由于感应的存在,在某些结构中非试绕组也会有较高的电压,尤其以截波作用下最为严重,这类感应过电压也会引起绝缘损伤,多台产品曾发生过此类故障。这种故障对施加电压波形影响较弱,而中点电流及电容传递电流均有变化。

3.13 截波试验时类似全波故障

图 12-77 为 300MVA/500kV 变压器故障。

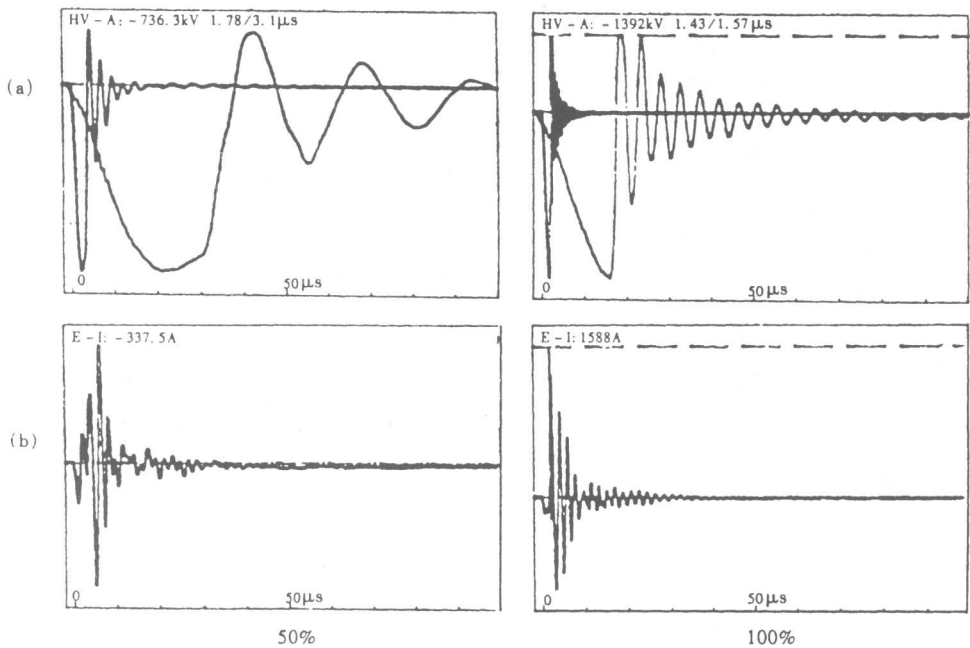


图 12-77 300MVA/500kV 变压器故障

(a)施加电压 快扫描 10μs,慢扫描如图示 (b)中点电流 扫描如图示

变压器进行截波试验时,在截断时刻前,绕组主绝缘承受幅值较全波电压为高而时间较短的电压作用,截断后电压产生振荡,绕组的纵绝缘与主绝缘承受振荡电压的作用。截断前的电压作用类似于全波作用,此电压可能把主绝缘打坏,产生电压截断,试验回路的截断装置不再动作。因此,这种故障非截断波的作用所产生,若施加与截波幅值相同的全波,主绝缘就产生故障。

图 12-77 图例中,电压和中点电流波形均有明显变化。

3.14 截波未见故障,处理或修理后合格

图 12-78 为 120MVA/220kV 变压器吊检未见故障,更换高压绕组后试验合格,图 12-79 为 63MVA/110kV 变压器吊检未见故障,处理后复试合格。

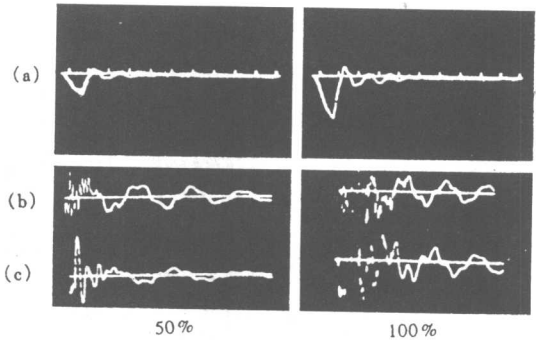


图 12-78 120MVA/220kV 变压器吊检未见故障,更换高压绕组试验合格

(a)施加电压 扫描 25μs (b)中点电流 扫描 25μs
(c)电容传递电流 扫描 50μs

图 12-78 电压波形不变, 两个电流波形有变化。图 12-79 三个波形变化微弱。

以上对一些图例按故障性质进行分析, 图中注明故障部位是吊心检查(包括解体检查)得到的结果, 未注明的是实体检查情况不详, 仅根据波形图分析。

根据记录电压电流示波图来判断是否存在故障并进一步确定故障性质是比较困难的, 尤其对局部损伤的小故障, 这就要进行深入的技术分析, 而更重要的是不断地总结经验。对于那些明显故障示波图, 可作如下定性判断:

(1) 全波电压截断: 此波形图意味着高压端对地放电, 包括外绝缘放电、主绝缘通过油隙放电、主绝缘通过固体绝缘件放电、沿绕组的贯通性放电、沿撑条的贯通性放电等。

(2) 全波中点电流幅值大增, 波长缩短: 这是首端沿绕组(或撑条)放电, 如为贯通性放电, 则相应地电压截断。若非贯通性放电而是绕组部分短路, 则中点电流增大。电流波形缩短, 伴随着电压波长缩短。

(3) 全波电容传递电流突然大增: 这是高压直接打到低压绕组, 伴随着电压截断。

(4) 截波试验截断后电压波形变化: 这意味着截断后截断回路有所改变, 在高的振荡电压及电压梯度作用下绝缘贯通性或严重的放电, 从而改变了变压器放电回路参数, 使截断后的电压波形变化, 如图例中过渡套管放电及沿撑条爬电。

(5) 截波试验截断前产生放电, 截断后电压波形变化: 这非截波故障, 而是类似全波故障, 是产品在全波作用下绝缘击穿, 此时截断装置不应动作。

4 传递函数法故障判断

以上所述是用电气方法记录试验回路中的电流、电压示波图, 将高、低压下的示波图进行对比, 若不变化, 即产品内部的等值回路没有改变, 没有绝缘损伤, 而有变化时则反映产品故障。

由于冲击试验中数字测量系统的应用, 它可将测量的模拟量变为数字量, 并可进行数据分析处理, 因此目前正在发展一种传递函数法来进行故障判断。

所谓传递函数, 是求取输出电流和输入电压的幅频特性, 然后求取对应频率两幅值的比值, 该比值具有导纳的量纲。如电容传递电流与施加电压各种频率下的幅值相比, 即为电容电流传递函数。

在变压器的冲击试验中, 认为试品参数是线性的, 在高、低电压两次试验中, 若电压波形不变, 无绝缘故障, 则电流示波图仅幅值变化而波形不变。实际上, 由于冲击发生器点火系统存在的分散性, 会对输出波形有影响, 根据经验, 此影响不大, 但从原理上来看, 很难保证两次电压完全相同, 因而电流波形会有微弱的变化。截波试验时, 截断时间有分散性, 一般在 $\pm 0.1\mu\text{s} \sim 0.2\mu\text{s}$, 相应的电流示波图会有变化。在以往的试验中, 这种变化只能靠经验来判断, 这是比较困难的。传递函数法中, 因它反映的是变压器本身的输入输出特性, 而与具体的输入信号无关, 因而即使两次施加电压波形不同, 若变压器无故障, 得到的传递函数也是相同的, 不会造成判断困难。

理论上, 传递函数是导纳性质, 不受施加电压波形等的影响, 是稳定的。但实际上, 由于采样频

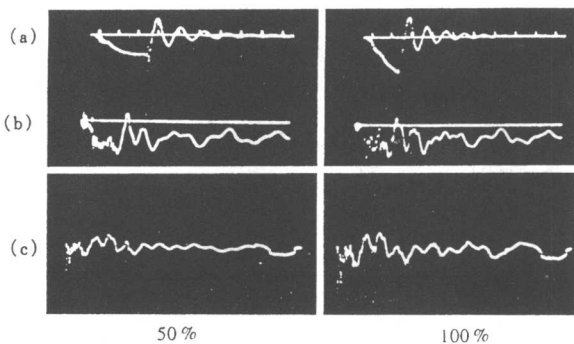


图 12-79 63MVA/110kV 变压器吊检未见故障, 处理后复试合格

(a) 施加电压 扫描 $10\mu\text{s}$, 截断时刻有干扰

(b) 中点电流 扫描 $25\mu\text{s}$

(c) 电容传递电流 扫描 $50\mu\text{s}$

率的有限,数字测量系统也受到干扰影响,绝缘良好的产品也会有微变的问题,同样也存在判断的困难。此方法至今尚未纳入 IEC 标准,尚应加以研究,应在生产中积累经验。

图 12-80 为用传递函数对一台 25MVA/132kV 变压器进行故障检测。采样时间 50ns,记录电压及电容传递电流波形,试验电压分别为 50%、80%和 100%三级,图中给出 50%对 80%和 50%对 100%的传递函数比。

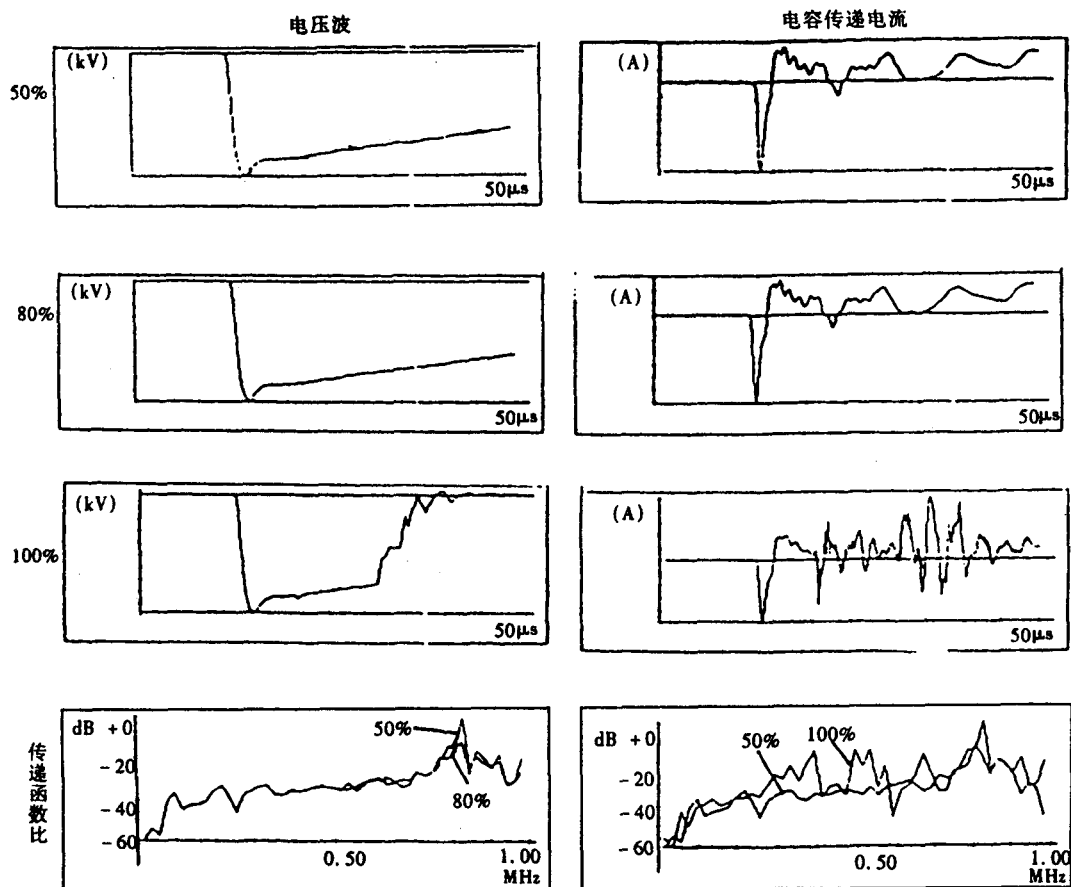


图 12-80 电容传递电流的传递函数

该产品因调压绕组入端引线距调压绕组末端距离太近,在额定全波试验电压 650kV 下产品击穿,整个调压绕组短路。

从时域波形来看,施加电压及电容传递电流在 80%电压时没有变化,试验通过。但 100%时明显畸变,产品击穿放电。从电容传递电流 50%与 80%下的传递函数对比中看出,80%曲线有极点幅值降低而无极点转移,说明内部未击穿,但发生局部放电。而 100%与 50%传递函数相比,相差很大,产品击穿。

5 超声波法检测及定位

5.1 基本原理

电气法故障检测是根据录取试验回路中的电流电压示波图来判断产品绝缘情况,这在波形变化较大时是易于判断的。但若变化不大则难于作出结论,需要其他的检测手段。电气法尚可根据示波图畸变情况,进一步确定某些故障的性质及故障的电气部位,但无法指示故障的几何位置。因

此,从故障判断及定位来看,可用超声波检测作为辅助方法。

变压器内部放电将在绕组中产生电磁脉冲和产生介质的机械振动声发射现象。此场波穿过绕组、油隙、纸板向外传播,按空间几何位置和传播介质的不同,声波到达不同点有不同的时延时间 t ,若波速度为 v ,则测量点与声源点间距离为 $S=vt$ 。产生放电的起始时间,以接收到电磁脉冲为起始点,因内部故障的电磁脉冲以近于光速的速度沿绕组传播,仅需数微秒即达首端,而场波的传播时间远大于此值,因此以电脉冲作为起始点不会产生大的误差。在冲击试验中,则可用施加电压作为起始点,同时记录电脉冲和声信号,即可求取场信号传播时间,见图 12-81。



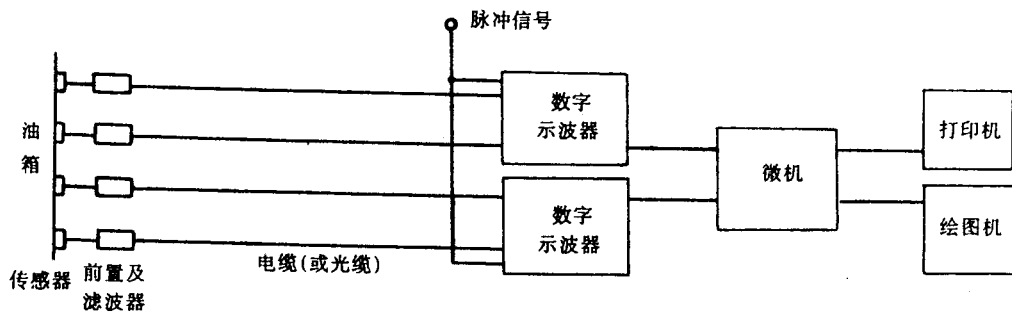
图 12-81 超声波传播时间的求取

a—冲击电压 b—超声波

放电声在变压器内的传播,服从一般声的传播规律,有一定的波速、衰减、反射、折射等现象。声波在单一油介质中传播时,其衰减约为在空气中衰减的千分之一,波速为 $1.4\text{mm}/\mu\text{s}$,而在固体中传播则衰减大而速度快(钢板为 $5.8\text{mm}/\mu\text{s}$)。关于声压与放电量的关系,与放电类型有关,若为油间隙放电,声压大,而绝缘内部放电则声压小。对于同类故障,放电量大时声压大。变压器绕组内部发出的声波要通过绕组、纸板、油隙、油箱等向外传播,有很多传播路径,图 12-81 记录的超声波是一个波列,很难决定等值波速,因此时延与波速的选取、示波图的分析等均要进行相应的研究。

5.2 检测系统

测量系统主要包括两个部分,即接收部分和记录部分,其框图见图 12-82。图中的数字示波器可以是单台或多台,探头数按需要配置。



数字示波器定位系统

图 12-82 超声波检测系统框图

接收部分为探头,包括压电晶体片、前置放大器及滤波器等。探头用永久磁铁固定在油箱壁上,用黄甘油或变压器油耦合,若用变压器油,则探头与油箱间应密封。压电晶体片为锆钛酸铅圆片,当声波传到压电晶体,产生微伏级信号,经前置放大为毫伏级。此信号用电缆或光缆传输,若用光缆,可提高其抗干扰能力,但要有光电转换才能输入到记录装置。

5.3 检测定位

超声波定位原理是三角形测量法,即由三个不同的测量点测得三个距放电源的直线距离,可求得电源的位置。

设故障点 A 的坐标 $A(X, Y, Z)$

三个测量点:

坐标 $C_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 到故障点距离 d_1

坐标 $C_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 到故障点距离 d_2

坐标 $C_3(X_3, Y_3, Z_3)$ 到故障点距离 d_3

可得联立方程:

$$(X-X_1)^2+(Y-Y_1)^2+(Z-Z_1)^2=d_1^2$$

$$(X-X_2)^2+(Y-Y_2)^2+(Z-Z_2)^2=d_2^2$$

$$(X-X_3)^2+(Y-Y_3)^2+(Z-Z_3)^2=d_3^2$$

由上列方程求解,即可求得 X, Y, Z 值。因变压器内部结构复杂,且各测量点信号强弱不同, d 值很难决定,只用三点常不能取得结果,要用更多的测量点。

上述方法是用计算求解联立方程,实用上可用作图法求解,即故障点 A 是以三个测量点 C 为球心,半径为 d 的三个圆球公共相交点。实际要作三个坐标的平面投影,以各测量点在各坐标平面投影位置为圆心,作出半径为 d 的圆,故障点 A 的坐标为各坐标面投影圆公共相交的区域,若多于三个测量点,可将各点均按此作图,求其公共相交处为故障坐标区域。

上述求解中的主要困难是测量点到放电点距离的求取,因超声传播路径很多,要通过各种不同的介质,有不同的波速,用一个波速决定各测量点距离是有误差的,上述联立方程无解,即不能相交,作图法也只能划出一个区域,不会太集中。为尽可能避免此误差,考虑油中传播衰减较小,取较大信号(即油中传播信号)决定时间,而以油中波速 $1.4\text{mm}/\mu\text{s}$ 计算距离。也可分析可能的各种路途组合,用不同的波速组合来求距离,但若对每个测量信号均如此处理,则工作量大,极不方便。

除三角形定位法外,第二种方法为最近点测量法,通常先在油箱同一水平面上布多个测量点,此多点测量时间必有一个最小值,而其两边则逐个增大,可作时间与水平坐标的 V 形曲线,然后在最短时间的坐标附近,按垂直方向再布多个测量点,同样可作出 V 形曲线。 V 形曲线的最低点即为距放电源的最近点,若时间为 t_0 ,由油箱的最近点向内按不同波速计算放电点位置,即先按油距及油速算出油中传播时间 t_1 ,则 $t_2=t_0-t_1$ 为经内部绕组的传播时间,再按该介质的速度计算内部传播距离,从而决定放电源位置。为使 V 形曲线精度较高,全部定位需要 20~30 个测量点。最近点测量法相对受波速影响较小,与传播路径关系不大,这是该法的最大优点。

第十三章 操作冲击电压试验

第一节 概 述

变压器在电力系统运行中要受到各种电压的作用,包括操作过电压的作用。操作冲击试验就是为了考核变压器耐受操作电压的绝缘性能,试验目的是用来检验变压器线端对地及三相变压器线端之间的操作冲击耐受能力。

按照 GB1094.3—1985 国家标准规定,电压 $\geq 300\text{kV}$ (即我国 330kV 及以上)变压器的操作冲击试验为例行试验。按照 GB1094.3—2003 新国标规定,除电压 $\geq 300\text{kV}$ 变压器的操作冲击试验为例行试验外;对于 $170\text{kV} < U_m < 300\text{kV}$ (即我国的 220kV)的变压器,如果没有规定进行短时 AC 电压试验,则应要求进行操作冲击试验。对此应由用户在询价订货时说明。

第二节 操作冲击电压的波形及产生

1 操作冲击电压波形

一般绝缘试验用操作冲击波形类似于雷电全波冲击波形,但不用视在波前时间而用实际的波前及半峰值时间,标准波形为 $250/2\,500\mu\text{s}$ 。波前时间允许偏差 $\pm 20\%$,半峰值时间允许偏差 $\pm 60\%$ 。

在变压器和电抗器的试验中,由于试品电感的影响,难以取得上述标准波,因此,GB7449—1987《电力变压器和电抗器的雷电冲击试验与操作冲击试验的导则》标准规定了变压器及电抗器操作冲击试验的标准波形,见图 13-1(a)和图 13-1(b)。波前时间与雷电冲击相同,用视在波前时间, T_1 为 $\geq 100\mu\text{s}$,主要考虑绕组的电压均匀分布(通常 $>100\mu\text{s}$,但小于 $250\mu\text{s}$ 时可以达到)。超过 90%峰值的时间 T_0 至少为 $200\mu\text{s}$,从视在起点 O_1 到第一个过零点的时间 T_2 至少为 $500\mu\text{s}$,最好为 $1\,000\mu\text{s}$ 。

2 操作冲击电压的产生

操作波电压一般用两种方法产生,一种是利用电磁感应原理,如在试验变压器或电力变压器的低压侧加一脉冲击波,在高压侧感应出高压操作波。用试验变压器产生操作波波前较长(约数百到数千微秒),不宜用于试验室中做产品试验,可用于户外试验场作长空气间隙、绝缘子串等线路绝缘试验。用电力变压器低压侧加压法可在试验室中应

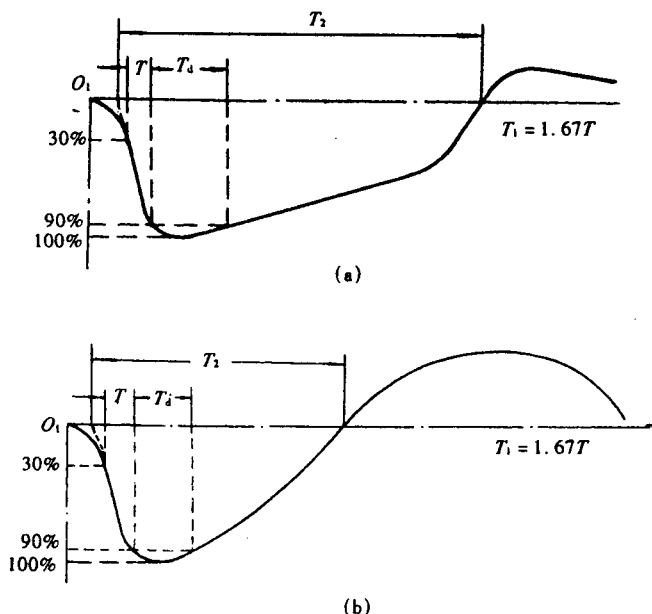


图 13-1 变压器和电抗器的操作冲击波形

(a)变压器 (b)电抗器

用,也适合于现场试验。第二种方法是用冲击电压发生器产生操作波,这是一种比较方便的方法,其原理计算及线路与雷电冲击波相同,不同的是操作波电阻值很大,如用高效率回路,则充电电阻亦相应增大,且电阻制造困难,充电时间长。若充电电阻不能增大,则效率降低。如充电电阻用刀闸开关代替,充电时合上,放电时分开,这样可保证效率,减少充电时间,但发生器结构要采取措施。

利用 3600kV 冲击电压发生器产生操作波,不同负载时波前电阻为 $20\text{k}\Omega\sim 100\text{k}\Omega$,放电电阻为 $130\text{k}\Omega\sim 170\text{k}\Omega$,为保证效率,每级充电电阻选 $500\text{k}\Omega$ 。采用上述电阻参数,空载或小电容试品时,效率在 $80\%\sim 90\%$,与雷电冲击波相当。若总波前电阻 $780\text{k}\Omega$,总放电电阻 $2\,000\text{k}\Omega$,外加负荷电容 $2\,500\text{pF}$ 时,产生 $6\,000/40\,000\mu\text{s}$ 操作波,效率仍有 70% 。因此,只要用足够大的充电电阻,可以保证较高的效率。

在制造厂进行变压器操作波试验时,由于有冲击电压发生器,可产生高压,因此均在高压端加压,而不用低压侧加压方法。

第三节 操作冲击电压波形的计算

1 铁心未饱和前的波形计算

变压器操作冲击试验线路可简化为图 13-2 等值电路。图 13-2 中 C_1 为主电容, R_1 为波前电阻, R_2 为波尾电阻, R_3 为充电电阻,可等值为波尾电阻,若 R_3 与 R_1 、 R_2 相比足够大,可忽略 R_3 而为高效率回路,但对操作冲击试验而言,目前所应用的发生器充电电阻一般均不是很大,此电阻对波尾影响不可忽略。 C_2 、 L_M 为被试变压器的等效电容和励磁电感。

L_M 为非线性电感,当电压较低、电压作用时间较短,铁心磁通未饱和时电感值很大,可使电压波很快下降到零。图 13-3 为同一试验回路参数下,考虑铁心出现饱和及 L_M 开路时试品电压波形。可以看出,当铁心饱和前,电压波形与 L_M 开路时一致,因此操作波波前时间 t_f (图 13-1 中符号为 T_1) 与 90% 持续时间 t_d (图 13-1 中符号为 T_d) 可取 $L_M=\infty$ 来计算。变压器操作波波前用名义波前时间,与雷电冲击波相同,因而可用与雷电冲击相同的计算方法。

非周期冲击波用以下双指数函数表示:

$$u(t)=A(e^{-p_1 t}-e^{-p_2 t})$$

(13-1)

由 $\frac{du}{dt}=0$ 求得最大值时间:

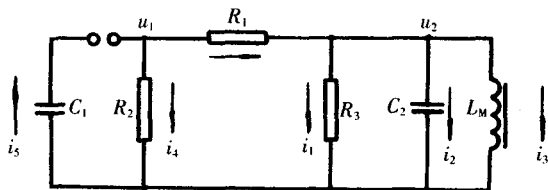


图 13-2 操作波试验等值回路

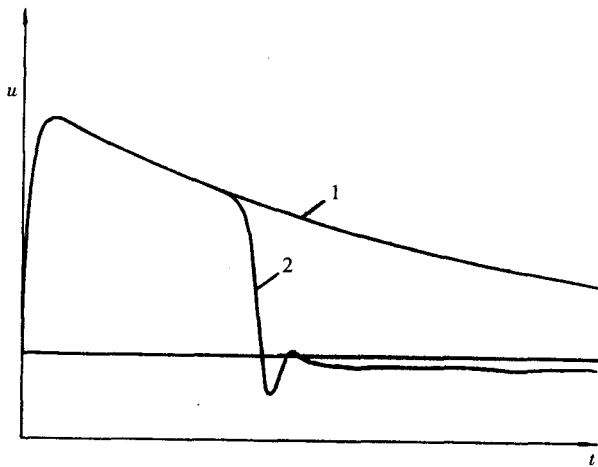


图 13-3 有 L_M 和无 L_M 时电压波形

1— L_M 开路 2—有非线性 L_M

$$t_m = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)} \quad (13-2)$$

将 t_m 代入式 (13-1) 求得最大值电压:

$$u_m = A \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\frac{P_2}{P_1} - 1}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{P_2/P_1}{\frac{P_2}{P_1} - 1}} \right] = A \xi_0 \quad (13-3)$$

$$\xi_0 = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\frac{P_2}{P_1} - 1}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{P_2/P_1}{\frac{P_2}{P_1} - 1}} \quad (13-4)$$

由波形定义, 取波前电压为 0.3 和 0.9 的相应时间为 $t_{0.3}$ 和 $t_{0.9}$, 则:

$$0.9 \xi_0 = e^{-P_1 t_{0.9}} - e^{-P_1 t_{0.9} \frac{P_2}{P_1}} \quad (13-5)$$

$$0.3 \xi_0 = e^{-P_1 t_{0.3}} - e^{-P_1 t_{0.3} \frac{P_2}{P_1}} \quad (13-6)$$

$$\frac{P_1 t_{0.9} - P_1 t_{0.3}}{0.6} = P_1 t_f \quad (13-7)$$

取波尾电压 0.9 及 0.5 时间分别为 $t_{0.9} + t_d$ 和 $t_{0.5}$, 则:

$$P_1(t_{0.9} + t_d) = -\ln 0.9 \xi_0 \quad (13-8)$$

$$P_1 t_{0.5} = -\ln 0.5 \xi_0 \quad (13-9)$$

由上各式, 可由 P_1/P_2 求得 ξ_0 , $P_1 t_f$ 及 $P_1 t_d$, 再由式 (13-7)、(13-9) 求得 $t_f/t_{0.5}$ 。

图 13-4 为 P_1/P_2 , $P_1 t_f$, $P_1 t_d$ 和 $t_f/t_{0.5}$ 的关系曲线。对于图 13-2 回路, 当 L_M 开路时, 常数 P_1 , P_2 值为:

$$P_{1,2} = \frac{(R_1 + R_3)R_2 C_1 + C_2 R_3 (R_1 + R_2)}{2C_1 C_2 R_1 R_2 R_3} \mp \sqrt{\left[\frac{(R_1 + R_3)R_2 C_1 + C_2 R_3 (R_1 + R_2)}{2C_1 C_2 R_1 R_2 R_3} \right]^2 - \frac{R_1 + R_2 + R_3}{C_1 C_2 R_1 R_2 R_3}} \quad (13-10)$$

计算例子:

回路参数 $C_1 = 0.05 \mu F$, $C_2 = 0.004 \mu F$, $R_1 = 15 k\Omega$, $R_2 = 80 k\Omega$, $R_3 = 200 k\Omega$, 算得:

$$P_1 = 0.3204, P_2 = 19.1796, P_1/P_2 = 0.0167$$

由图 13-4 查出数据并算得:

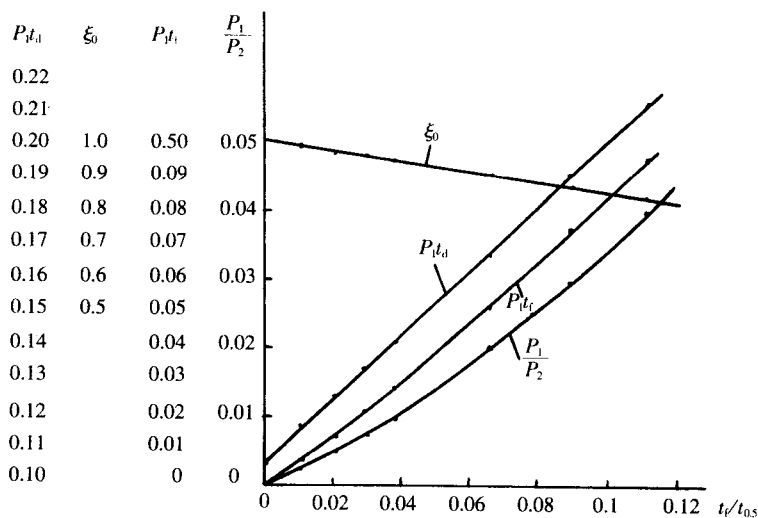


图 13-4 非周期波计算曲线

$$P_{1t}=0.045, t_t=140\mu s, P_{1d}=0.16, t_d=499\mu s, t_t/t_{0.5}=0.0575, t_{0.5}=2442\mu s$$

若计及有 L_M 非线性电感,可用下述的按磁化曲线的方法计算,得到 t_1 为 $141\mu s$, t_d 为 $493\mu s$,即两种方法计算结果一致。

应该指出,上述计算方法与雷电冲击波计算相同,部分公式有所重复,图 13-4 曲线与图 12-10 曲线相同,所不同的是引入了操作波使用的 P_{1d} ,对于不同试验回路, P_1 、 P_2 值不同,若为图 12-9(a) 线路,公式(12-3)之 $P_{1,2}$ 值亦可用于上述计算中。

就试品的等值参数而言,与雷电冲击试验有极大的不同。在雷电冲击试验时,由于波前较陡, C_2 可用方波下变压器入口电容来代替,但在操作波下,由于电压的等值频率比雷电波低得多,励磁电感将起作用,因此 C_2 不能用入口电容值代替。图 13-5 用以分析对地电容折算到端点的等效电容情况。设为双绕组变压器,高压绕组总对地电容为 C_{21} ,对低压绕组电容为 C_{22} ,低压绕组对地电容为 C_{23} ,这些电容为均匀分布,可用电桥测量。当电压比较大,即低压绕组 a_x 电压较低时,低压绕组可看作为零电位,可不计 C_{23} 的影响。总对地电容折算为端子的等效电容是按能量相等考虑的。绕组对地电压均匀分布,若绕组端点电压为 u ,则距地 y 点的电压 $u_y = \frac{u}{l}y$, 该点 dy 长的对地电容能量为 $\frac{1}{2} \cdot$

$\frac{C_{21}+C_{22}}{l} u_y^2 dy$, 积分即可求得总能量,使其与端点 A 等值电容

C_2' 的能量相等,求取 C_2' 值,即:

$$\frac{1}{2} C_2' u^2 = \int_0^l \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{21}+C_{22}}{l} u_y^2 dy = \int_0^l \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{21}+C_{22}}{l^3} u^2 y^2 dy$$

$$C_2' = \frac{C_{21}+C_{22}}{3}$$

(13-11)

除对地电容外,尚有纵向电容 C_2'' ,可利用下式求得:

$$C_2'' = \frac{C_{21}+C_{22}}{(\alpha l)^2}$$

(13-12)

α 为变压器绕组的空间因数,为绕组单位长度对地电容和纵向电容比值的方根数,一般对于连续式绕组 $\alpha l=5\sim 15$,对纠结式绕组 $\alpha l=1\sim 3$ 。因此可求得等效电容为:

$$C_2 = C_2' + C_2'' = (C_{21}+C_{22}) \cdot \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{(\alpha l)^2} \right]$$

(13-13)

以上是求取等效电容的方法,应注意的是,若电压比较小,即低压绕组电压较高,或高压绕组中点不直接接地时,对地电容计算要考虑这些影响。

2 按磁化曲线计算波形

如上所述,当铁心未出现饱和前,其电压波形与 L_M 开路时一致,因此波前时间 T_1 , 90%电压持续时间 T_d 和效率等均可用雷电冲击的计算方法,但当饱和出现时, L_M 开路不能反映波形变化,此时应考虑其励磁特性。

变压器进行操作冲击试验时,铁心磁通是由剩磁开始按磁滞回线变化,但实际上难以取得任意剩磁下不同电压的磁滞回线。为定性分析,分两种情况计算波形,即按磁化曲线计算和按典型的磁滞回线计算。

大型变压器都用性能良好的硅钢片,图 13-6 是样本中给出的 30RGH120 和 30QG120 的磁化

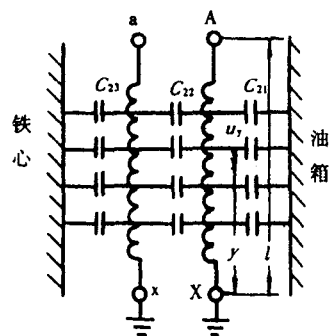


图 13-5 绕组对地电容分布

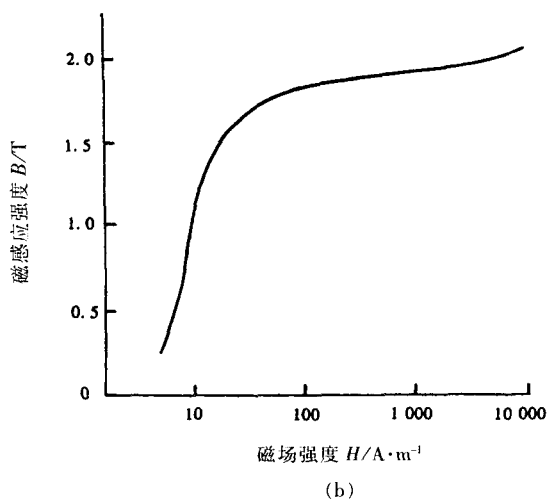
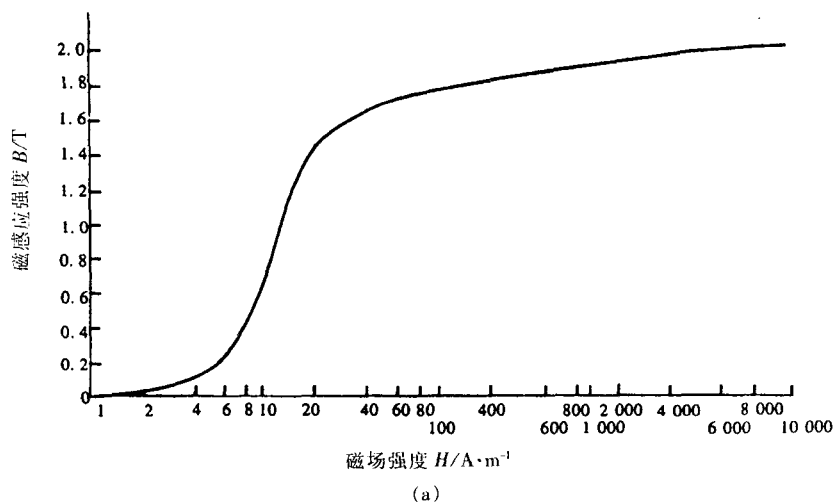


图 13-6 硅钢片磁化曲线
(a)30RGH120 磁化曲线 (b)30QG120 磁化曲线

曲线。

用图 13-6(a)曲线及相应的方法对一试品按图 13-2 等值回路进行计算。试品为 500kV 单相自耦变压器，高压匝数 1 057 匝，铁心截面为 7 547cm²，磁路长度 9.835m，计算回路参数为： $C_1=0.111\mu\text{F}$ ， $R_1=16.8\text{k}\Omega$ ， $R_2=33.7\text{k}\Omega$ ， $R_3=104\text{k}\Omega$ ， $u_1=1\,470\text{kV}$ ， C_2 取 4 000pF。计算和试验波形参数见表 13-1。

图 13-7(a)为该试品试验电压及中点电流波形，图 13-7(b)为计算的电压、各支路电流及铁心 B 值的变化曲线。

图 13-7(b)的有关说明：

u_2 的变化在铁心未饱和前 L_M 可视为开路，达饱和后迅速下降；

由于有 R_1 及 R_3 ，电压 u_1 均高于 u_2 ；

铁心磁感应强度的增量 ΔB 与 u_2 成正比， u_2

表 13-1 波形参数

参数	u_2/kV	$T_1/\mu\text{s}$	$T_0/\mu\text{s}$	$T_2/\mu\text{s}$
计算值	1 141	150	491	1 805
试验值	1 172	157	443	1 910

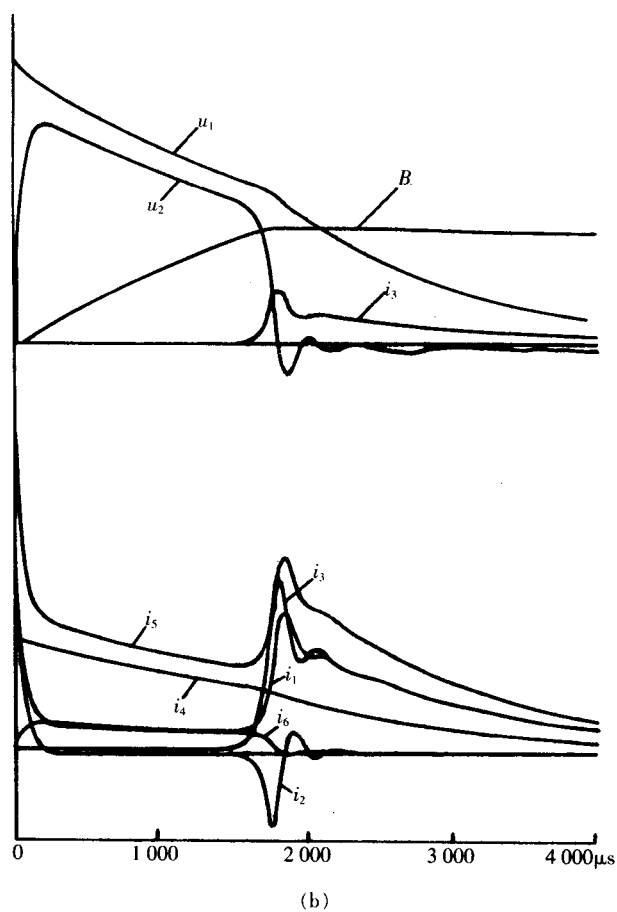
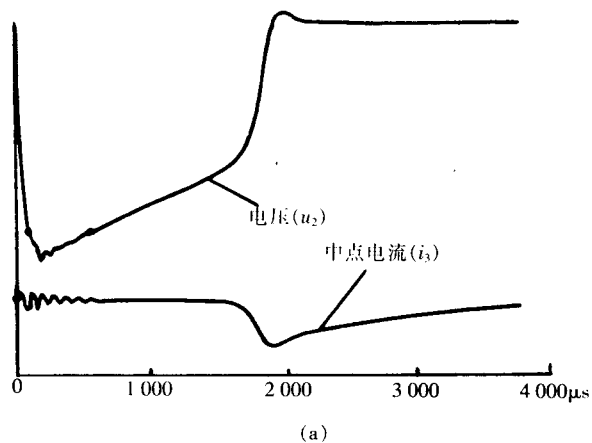


图 13-7 试品的试验及计算波形

(a) 试验电压及中点电流 (b) 计算电压、各支路电流及磁路 B 值

为正时一直增加, u_2 为零时最大, 以后缓慢下降(因 u_2 负值很小), 最后到零。

电流 i_3 在未饱和前很小, 饱和时突然增大;

电流 i_2 在 $t=0$ 时, u_2 为零, C_2 的充电电流 i_2 很大, u_2 到峰值后即降低, 饱和时 u_2 下降, C_2 对 L_M 放电, i_2 为振荡的负(正)值;

电流 i_6 随 u_2 变化;

电流 $i_1=i_2+i_3+i_6$, 因此 C_2 起始充电和铁心饱和时均较大;

电流 i_4 随 u_1 变化;

电流 $i_5=i_1+i_4$, 在冲击的起始处和饱和后较大, 回路中各支路电流值以 i_5 最大, 由冲击电容 C_1 供给。

以上是按硅钢片的磁化曲线计算, 实际上, 由于铁心中有气隙及转角, 一般励磁电流要增大, 计算结果会有偏差。对于实际产品的励磁特性, 也可用空载试验的 $U.I$ 曲线来决定, 但由于电源容量等的限制, 电压及电流均出现高次谐波, 难以求取其 BH 曲线。虽然产品的准确 BH 曲线难以确定, 但经多次计算认为, BH 曲线的差异及励磁电流的增大对电压波形参数 (T_1 、 T_d 、 T_2 、 u_2) 影响不是很大, 因此用典型的 BH 曲线来计算研究回路中电压与电流的变化是可行的。

关于图 13-2 中试验回路各参数对试品电压 u_2 的影响, 图 13-8 至图 13-13 给出 u_2 曲线, 计算产品同上, 回路基本参数为 $C_1=0.05\mu F$ 、 $C_2=0.004\mu F$ 、 $R_1=15k\Omega$ 、 $R_2=80k\Omega$ 、 $R_3=200k\Omega$ 、 $u_1=1\ 500kV$, 各图中仅改变其中一个参数, 其他与基本参数相同。

以上各图中回路元件数值变化对电压 u_2 的各波形参数影响范围见表 13-2。

关于回路参数对试品电压 u_2 的影响, 作以下说明:

(1) C_1 对 u_2 的影响: 除波形 6 (C_1 为 $0.02\mu F$) u_2 不出现饱和现象外, 其他波形均有饱和。 C_1 增大, 波形下降缓慢, 其 T_d 值较大, 铁心更快达到饱和。 T_2 值减小。

(2) C_2 对 u_2 的影响: C_2 主要影响波前时间、效率并影响相应的波形时间。

(3) R_1 对 u_2 的影响: 主要影响波前时间及效率;

(4) R_2 对 u_2 的影响: R_2 为放电电阻, 主要影响峰值后波形变化, 电阻小时下降较快, 饱和程度减弱, 曲线 6 甚至不饱和。

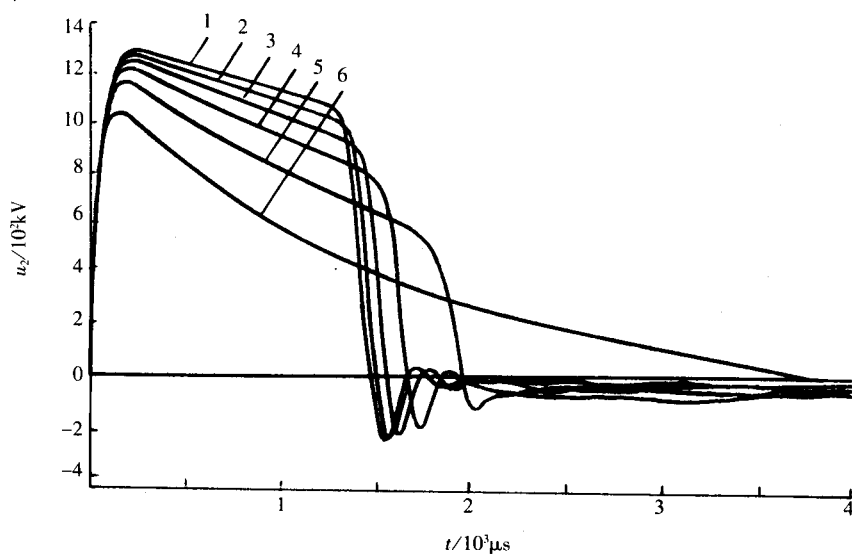


图 13-8 C_1 对 u_2 的影响

$C_1(\mu F)$: 1—0.095 2—0.08 3—0.065 4—0.05 5—0.035 6—0.02

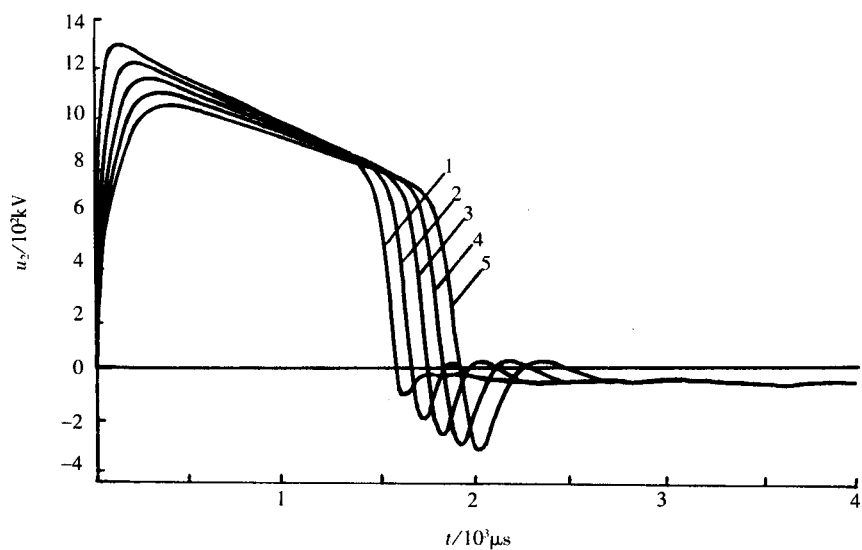


图 13-9 C_2 对 u_2 的影响
 $C_2(\mu\text{F})$: 1—0.002 2—0.004 3—0.006 4—0.008 5—0.01

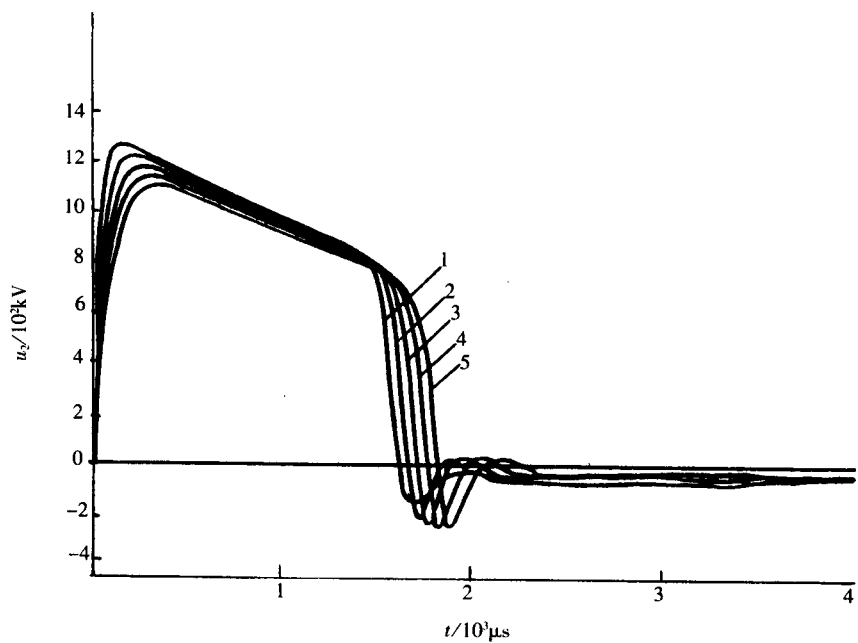


图 13-10 R_1 对 u_2 的影响
 $R_1(\text{k}\Omega)$: 1—10 2—15 3—20 4—25 5—30

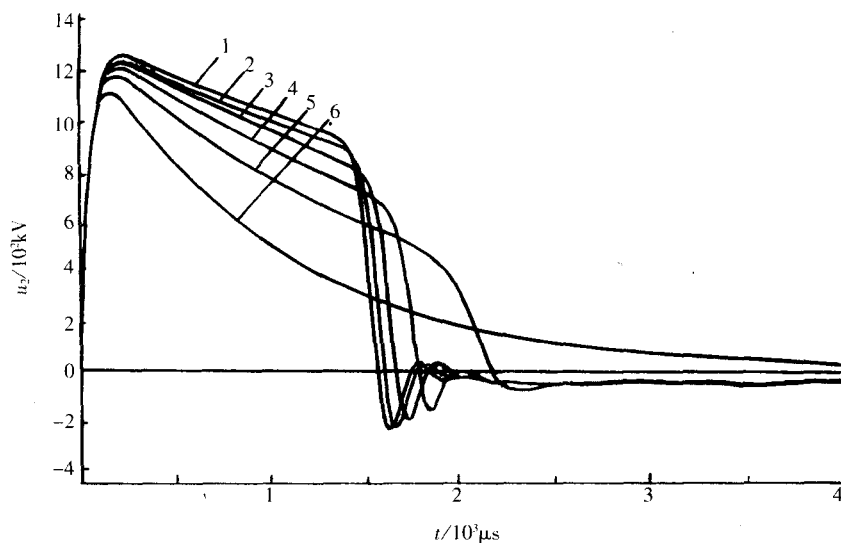


图 13-11 R_2 对 u_2 的影响

$R_2(\text{k}\Omega)$: 1—10 2—15 3—20 4—25 5—30

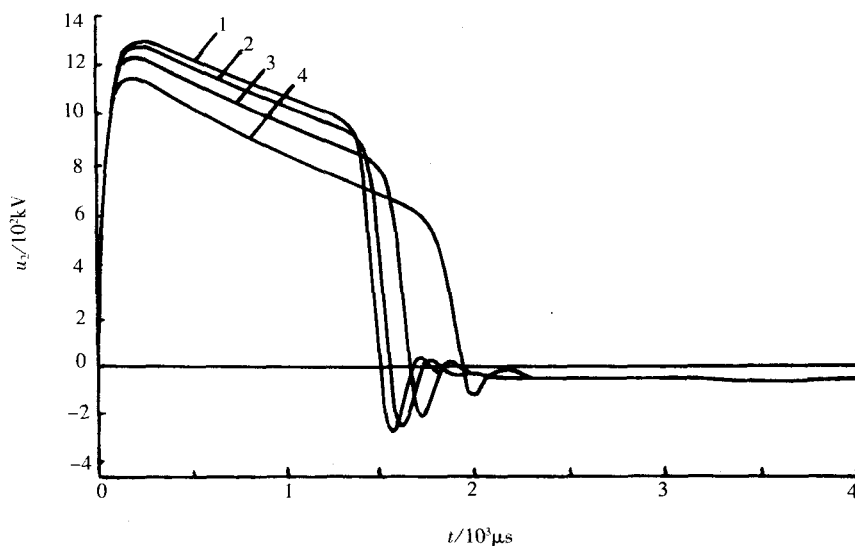


图 13-12 R_3 对 u_2 的影响

$R_3(\text{k}\Omega)$: 1—800 2—400 3—200 4—100

(5) R_3 对 u_2 的影响: R_3 与 R_1 形成分压, 亦属于放电电阻, 影响效率及波长;

(6) u_1 对 u_2 的影响: u_1 电压值大小主要影响饱和, 相应的影响 T_2 , 而对其他参数影响不大。曲线 5 ($u_1=500\text{kV}$) 不出现饱和。

3 按磁滞回线计算波形

以上是按磁化曲线进行非线性回路的分析计算。实际上, 铁心的励磁是按磁滞回线变化。由于剩磁和 B_{max} 的不同, 会有很多磁滞回线, 要建立那么多的磁滞回线并做波形计算是不可能的。为分

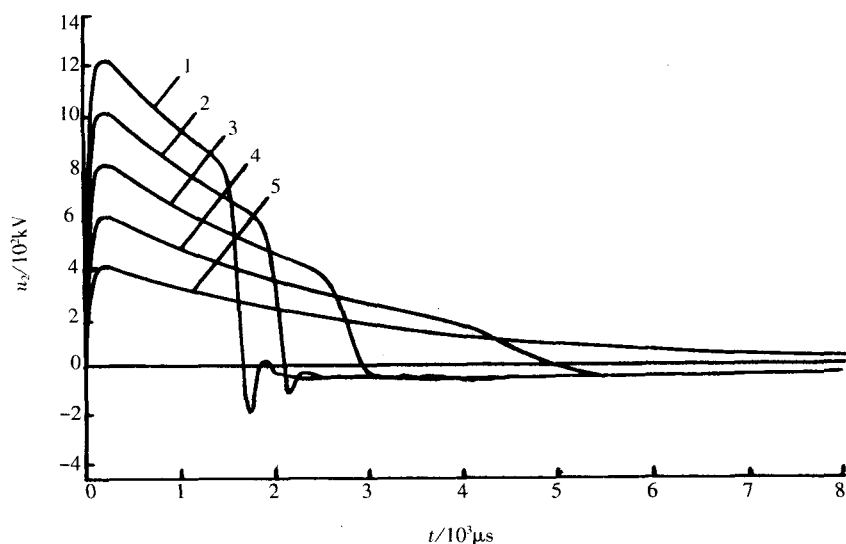


图 13-13 u_1 对 u_2 的影响

u_1 (kV): 1—1 500 2—1 250 3—1 000 4—750 5—500

表 13-2 回路元件对电压影响

回路元件		波形参数					
元件	调整值	$T_1/\mu s$	$T_d/\mu s$	$T_2/\mu s$	K_1	K_2	η
$C_1(\mu F)$	0.095~0.035	15~132	793~387	1 460~1 960	0.86~0.69	2.67~2.45	0.86~0.77
$C_2(\mu F)$	0.002~0.01	78~288	415~680	1 580~1 920	0.78~0.80	2.70~2.30	0.86~0.70
$R_1(k\Omega)$	10~30	100~243	450~600	1 620~1 820	0.78~0.79	2.70~2.20	0.84~0.73
$R_2(k\Omega)$	120~40	145~130	607~337	1 560~2 180	0.83~0.61	2.61~2.36	0.82~0.78
$R_3(k\Omega)$	800~100	151~130	592~414	1 500~1 937	0.83~0.72	2.72~2.34	0.86~0.76
$u_1(kV)$	1 500~750	141	493	1 662~4 880	0.79~0.51	2.54	0.81

注:上表中不饱和波形未统计在内

$$K_1\text{—波形系数}, K_1 = \frac{S}{u_{2ms} T_2};$$

S — u_2 与 x 轴坐标间的面积(时间在 $0 \sim T_2$ 间);

$$K_2\text{—波前时间系数}, K_2 = \frac{T_1}{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R_1};$$

$$\eta\text{—效率}, \eta = \frac{u_{2ms}}{u_1};$$

析剩磁影响和分析按磁滞回线计算的波形情况,仍用样本中的典型回线(见图 13-14)进行计算。

图 13-15 是某一回路参数按 B_m 为 1.7T 的磁滞回线计算结果(u_{21} 和 B_1),作为比较,亦给出按磁化曲线计算的波形(u_{22} 和 B_2),计算的主电容充电电压 u_1 为 670kV,过渡过程结束后, B_1 剩磁为 1.27T,而 B_2 为零。计算 u_{21} 时, B_1 是按最大剩磁-1.27T 开始计算。

由计算波形可以看出,在铁心饱和前, u_{21} 和 u_{22} 变化基本相同,当出现饱和时,两条电压曲线才分开;有反向剩磁的 u_{21} 变化缓慢,而剩磁为零的 u_{22} 则突然下降,电压过零时间 T_2 大为缩短。有反向剩磁的 B_1 最大值比剩磁为零时的 B_2 最大值为小,即无剩磁时相对比较饱和。

4 反励磁及波长时间估算

根据以上分析, 波长时间 T_2 与铁心尺寸、试验电压、回路参数、剩磁等因素有关, 这些影响归结为铁心磁通的饱和, 其波长时间 T_2 可如下近似估算。

被试变压器绕组上的电压 u 为:

$$u = W \frac{d\Phi}{dt} \quad (13-14)$$

$$\int_0^{T_2} u dt = W \cdot \Delta\Phi = K_1 u_{2m} T_2 \quad (13-15)$$

$$u_c = 4.44 / W \Phi_c \quad (13-16)$$

用以上两式即可求得电压过零时间 T_2 :

$$T_2 = \frac{1}{4.44 / K_1} \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Phi_c} \cdot \frac{u_c}{u_m} \times 10^6 \quad (13-17)$$

式中 f ——变压器工作频率, 50Hz;

$\Delta\Phi$ ——磁通增量, T;

Φ_c ——额定电压磁通, T;

u_c ——绕组额定电压(相电压有效值), kV;

u_{2m} ——试验电压最大值, kV。

按上述例子的计算, 波形系数 K_1 在 0.5~0.85 时, 对 500kV 变压器试验, 试验电压 u_{2m} 为 1 050kV~1 240kV, 即 $\frac{u_c}{u_m}$ 为 0.27~0.24, 对 330kV 产品试验, $\frac{u_c}{u_m}$ 为 0.22~0.20, 对 220kV 级产品, 则为 0.20~0.17。在产品设计中, 取工作磁密为 1.7~1.75T。以上几个参数变动不是太大。在产品试验中, 一般磁通量达饱和值 Φ_s (磁感应强度 B 为 1.95~2.0T), 若剩磁通为 Φ_r (硅钢片性能愈好, Φ_r 愈高), 则每次试验时磁通增量 $\Delta\Phi = \Phi_s - \Phi_r$, 由磁滞回线粗略推算, 30RGH120 在 B_m 为 2.0T 时, 剩磁约为 1.5T。对不同的剩磁, $\frac{\Delta\Phi}{\Phi_c}$ 值如下:

$$\text{最大正向剩磁时: } \frac{\Delta\Phi}{\Phi_c} = \frac{2.0-1.5}{1.7} = 0.29$$

$$\text{无剩磁时: } \frac{\Delta\Phi}{\Phi_c} = \frac{2.0-0}{1.7} = 1.18$$

$$\text{最大反向剩磁时: } \frac{\Delta\Phi}{\Phi_c} = \frac{2.0+1.5}{1.7} = 2.06$$

按以上估算, 最大反向剩磁波长约为最大正向剩磁的 7 倍, 这就是主要用反向励磁来调整波长的原因。实际上, 变压器用硅钢片性能会有所不同, 产品的工艺因素会增大励磁电流和损耗, 铁心剩磁尚需进一步研究。

要取得最大的反向剩磁, 实际上是难以做到的, 因为这意味着要加 100% 的反向电压, 在内、外绝缘方面都是不允许的。按一些计算来看, 在无剩磁情况下一般可满足标准波长。因此为保证 T_2 和不影响变压器绝缘, 考虑反向励磁电压约使剩磁为零即可。根据计算及实际试验, 建议反向励磁电

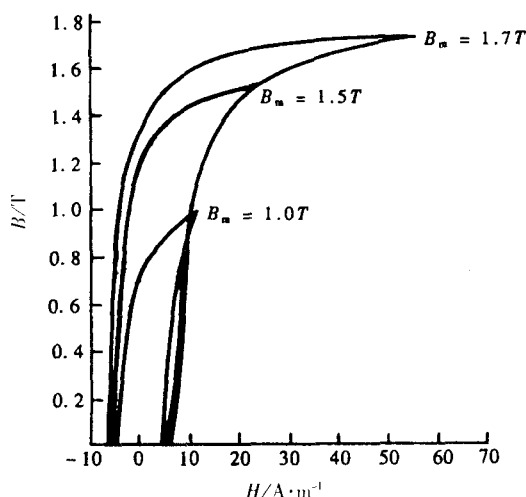


图 13-14 30RGH120 磁滞回线

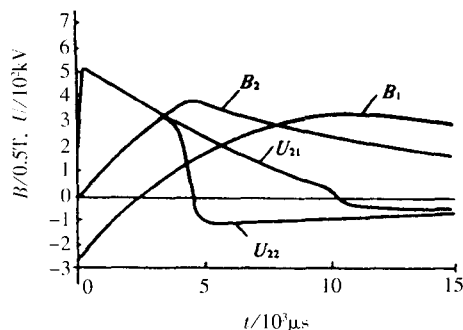


图 13-15 按磁滞回线和磁化曲线计算波形比较

压为额定试验电压的 20%~40%。

对于剩磁对波尾时间 T_2 的影响,在实际试验中是经常遇到的,施加反向励磁来加长 T_2 是最有效的方法。例如在图 13-7(a)试验中,当施加 50%电压后不加反励磁,接着施加同极性(负)100%电压(1170kV)时, T_2 为 880 μ s,而当两次 100%电压间施加约 30%反向励磁时, T_2 值变为 1 900 μ s(表 13-1)。

应再次指出,在雷电冲击全波试验中,波尾电阻加大可增加波长,但在操作波试验,会得到相反的结果,波尾电阻的增加使电压波形变平缓,加大 90%电压时间,由于加速的励磁, T_2 将变小。

第四节 变压器操作冲击试验

变压器操作冲击试验时,虽然可以根据本章第三节所述的波形参数计算公式进行分析和估算,但实际试验时仍要根据不同的产品进行多次调试,并应以实际调整的波形参数进行试验。

变压器操作冲击试验线路以图 13-16 三相自耦变压器来说明。A 端施加电压,非试端 A_m 、a 及非试相 B、 B_m 、C、 C_m 、b 均开路或 B、C 连接在一起开路,即非试端及非试相均开路,这是与雷电冲击试验接线的主要不同。O 端接中点电流测量,而 c(或 a、b)接电容传递电流测量。试验时各绕组均按电压比产生电压,就三相变压器来说,由于三相磁路分配的关系,非试相将产生 0.5 倍电压,因此相邻相间为 1.5 倍试验电压。

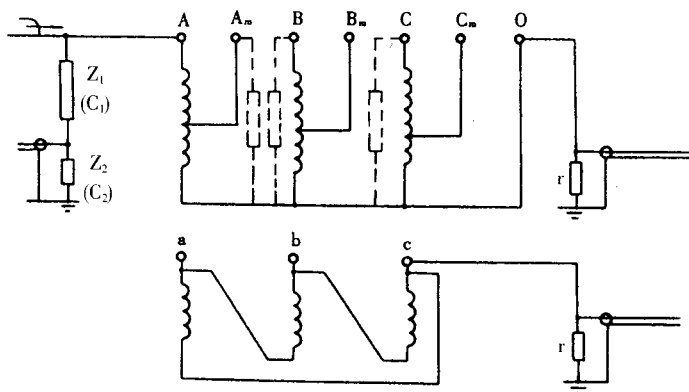


图 13-16 变压器操作波试验线路

Z_1, Z_2 —分压器 r —分流器

由于相间耦合电容、绕组本身的电容和电感的存在,可能在被试端和非试相端子电压上产生附加振荡,若不采取适当措施,非试相端子电压要高于 $0.5u$,相间电压亦高于 $1.5u$ 。对于自耦变压器的被试相非试端子,也可能产生振荡,使电压超过该端子的额定耐受电压。此时,通常在非试相端子上和被试相非试端子上接入电阻负载,这样将端子及相间电压限制在额定值内,见图 13-16 虚线所示,若 B、C 端连在一起试验,可共用一个电阻。标准中建议的负载电阻值为 $10k\Omega$ ~ $20k\Omega$ 。

当接入调整电压的电阻负载后,将影响施加电压波形,主要是饱和现象减弱,波尾下降较快,90%电压持续时间缩短,要注意调整。

操作冲击电压测量要用电容分压器,而不能用电阻分压器,线路如图 12-39,但示波器电缆末端不能接匹配电阻。由于操作波波形较缓,对低压臂电容的电感要求不是太严格,其他干扰较轻,容易测量。

变压器操作波试验时,应记录三个示波图来判断故障,即记录输入电压、中点电流及电容传递电流,输入电压的扫描时间在 $1\ 000\mu$ s~ $5\ 000\mu$ s,中点电流扫描时间与电压波扫描时间相同,此电流主要是波前时的振荡电流及饱和时刻出现的励磁电流,在有负载电阻时,励磁电流缓慢增大而非饱和时出现大幅值电流。电容传递电流扫描时间约 500μ s~ $5\ 000\mu$ s,主要记录波前及峰值附近传递到低压的电流或记录全过程的电流。

变压器操作波试验时,由于铁心励磁,会有较大的声音,但此励磁声音与内部故障的放电声有明显的不同,容易区别。

操作波试验故障判断,也是比较高、低压下电压电流波形,由于铁心励磁电感的非线性,实际上在不同电压下或两次相同电压下均不能得到完全相同的示波图,电压持续时间的变化及一些电流幅值的变化等并不说明产品有故障,这是与雷电冲击故障判断的主要区别。虽然存在非线性现象,但若有故障,有可能出现不同于持续时间缩短的电压截断,电流波中出现或大或小的高频振荡,产品内部有放电声,综合考虑这些现象可正确判断产品的绝缘情况。

下面给出一些操作波试验的例子。

图 13-17 和图 13-18 为 500kV 单相变压器试验正常波形,在 100% 试验电压时均出现饱和现象,但 50% 电压时则可能有或没有饱和。

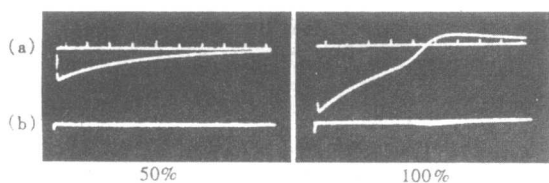


图 13-17 250MVA/500kV 单相自耦变压器

(a)施加电压 扫描 5 000 μ s

(b)中点电流 扫描 5 000 μ s

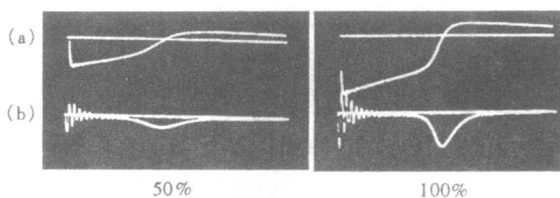


图 13-18 250MVA/500kV 单相变压器

(a)施加电压 (b)中点电流

图 13-19 为 500kV 三相变压器试验正常波形。为了减小相邻相及中压端的振荡,均接有电阻,因此示波图有较大的不同,电压缓慢下降,没有饱和突然下降现象,相应的 90% 电压持续时间减小。由于有电阻负载,中点电流有较大的数值,没有饱和电流出现。因电压波有振荡,也有大幅值的电容传递电流。图中亦给出相邻非试相的电压波,该电压与试验相电压有相反的极性。

图 13-20 为 500kV 单相自耦变压器低压套管击穿故障,三种示波图均有明显的变化。

图 13-21 为 160MVA/220kV 自耦变压器高压分接线对油箱放电,电压截断,中点电流亦有明

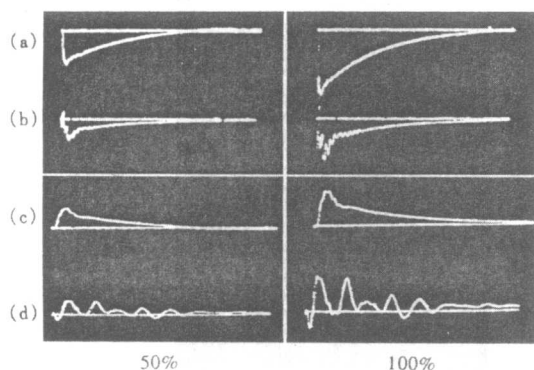


图 13-19 360MVA/500kV 三相变压器

B 相试验合格

(a)试验相端电压 扫描 5 000 μ s

(b)中点电流 扫描 5 000 μ s

(c)非试相电压 扫描 5 000 μ s

(d)电容传递电流 扫描 1 000 μ s

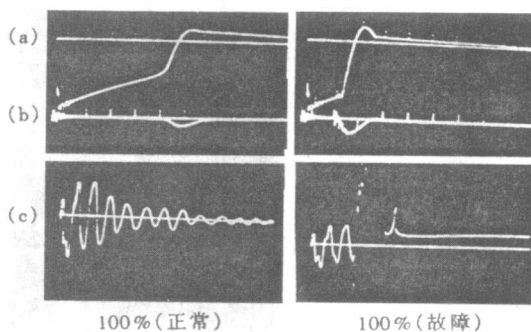


图 13-20 167MVA/500kV 单相自耦
变压器低压套管击穿

(a)施加电压 扫描 5 000 μ s

(b)中点电流 扫描 5 000 μ s

(c)电容传递电流 扫描 5 000 μ s

显变化。

图 13-22 和图 13-23 为两台不同容量的自耦变压器,施加电压变化不明显,中点电流饱和后有变化,产品复试感应耐压放电。图 13-24 为 250MVA/500kV 变压器的放电故障。

图 13-25 为 160MVA/220kV 自耦变压器中压引线在木夹件处击穿,三个波形均有明显变化。

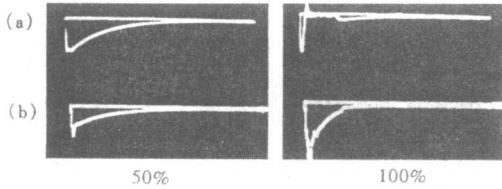


图 13-21 160MVA/220kV 自耦变压器高压分接线对箱壁放电
(a)施加电压 扫描 5 000 μ s
(b)中点电流 扫描 5 000 μ s

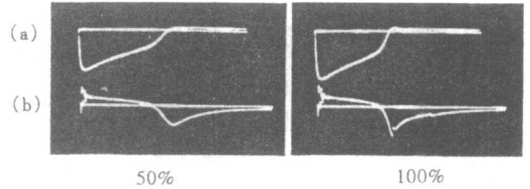


图 13-22 150MVA/220kV 自耦变压器复试感应耐压试验
(a)施加电压 扫描 5 000 μ s
(b)中点电流 扫描 5 000 μ s

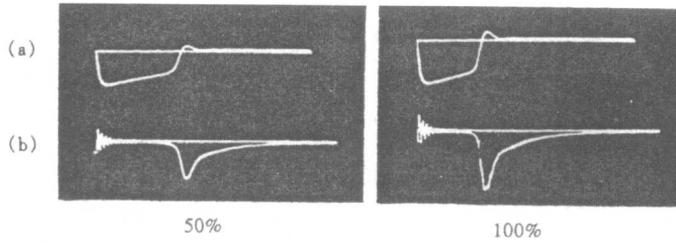


图 13-23 250MVA/500kV 自耦变压器复试感应耐压放电
(a)施加电压 扫描 5 000 μ s (b)中点电流 扫描 5 000 μ s

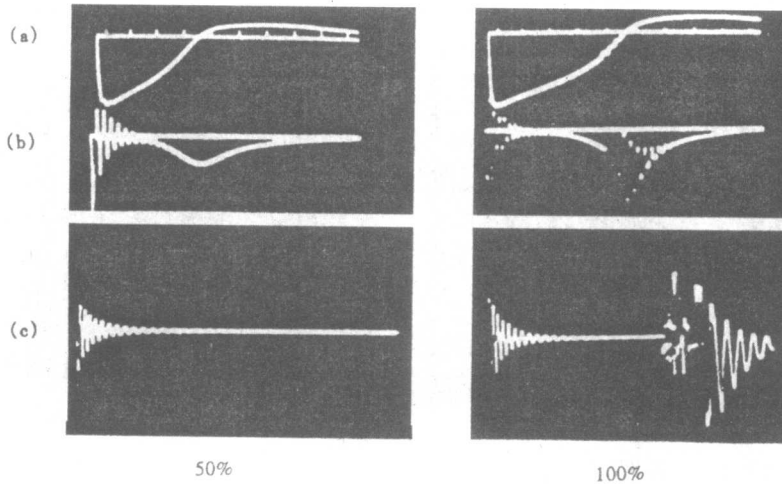


图 13-24 250MVA/500kV 变压器故障
(a)施加电压 (b)中点电流 (c)电容传递电流

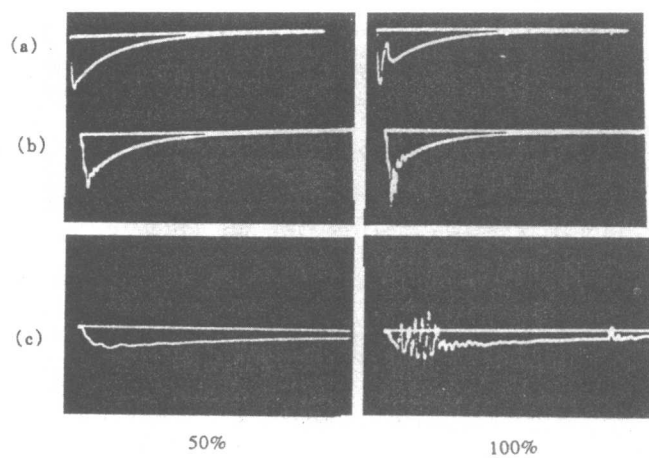


图 13-25 160MVA/220kV 自耦变压器中压引线在木夹件处击穿

(a)施加电压 (b)中点电流 (c)电容传递电流

注:试验时低压绕组和非试相高压绕组经电阻接地。

第十四章 变压器油试验

第一节 概 述

变压器油(这里专指从石油馏分制取的变压器油)作为一种绝缘介质和传热介质,被广泛地应用于油浸式变压器、电抗器、互感器、调压器等产品(以下统称为变压器产品)中。随着变压器产品电压等级、容量及技术参数与安全性的不断提高,对变压器油的性能和质量水平的要求也越来越严格。为保证油的品质确能满足变压器产品的使用要求,就要开展变压器油的试验。根据国家标准、行业标准和不同产品的要求,开展不同项目的试验考核。

1 油的适用性试验

不论出于什么原因,决定要重新筛选一种新的油品时,或常用油品出产地、油品精制工艺改变时,对新油品的适用性,均要按照有效标准和使用要求进行全项目的试验考核。并且要附加变压器固体材料与油的相容性试验,以确定油品可否使用或要否调整与该油品不相容的某种材料。

2 油品验收试验

选定的或常用的油品采购进货时,要按照约定的技术条件和技术指标进行验收试验,以判定可否收货入库。

3 油质量水平的控制试验

3.1 油注入产品前的试验

因变压器产品电压等级的不同,对油的某些指标规定了不同的要求。在全部常规指标合格的基础上,某些指标,如击穿电压、介质损耗因数($\tan\delta$)、含水量等,必须达到规定的水准才可注入产品。不同电压等级的产品,有不同的要求。

3.2 油注入产品后的复验

满足注入指标要求的油按注油工艺规程注入产品静放规定时间后,在进行产品试验之前,要取出油样进行重点项目(如 $\tan\delta$ 、含水量)的复验,确认仍符合要求才可进行产品绝缘试验。

3.3 油中溶解气体分析

对于220kV~500kV的变压器进行规定的长期空载试验前后、500kV变压器油流静电试验前后,均要取出油样进行油中溶解气体分析,目的在于判断变压器内部是否存在局部过热或油流静电放电等潜伏性故障。

4 油品质量证明试验

变压器产品向用户交付出厂前,取油样按GB2536—1990《变压器油》标准的全部检验项目及合同约定的其他检验项目进行试验,试验结果必须全部符合要求。实测结果记入油品质量合格证书,随同其他出厂文件交送用户。220kV以上变压器的油质合格证书中还应记入油中溶解气体分析的实测结果。油质合格证书,既是向用户出具的质量证明,又是用户对运行油质量监测的对照基础。

第二节 油试样采集

变压器油是高纯净度的液体介质。为使油试验结果能够真实地反映油品的实际质量状况,首先应做到正确、合理地采集油试样,做到取样部位应对母体油具有充分的代表性,在取样全过程中对

油样不发生任何污染。

1 取样部位

从油槽车、储油罐、油桶中取油样时,必须从底部油层中采取。从变压器产品取油样时,应从产品自设的取样口采取。如是从一个以上的槽车中、油罐中同时取油样,应单独进行试验以区分各自的质量状况。如从整批油桶中取油样,则应按总油桶数选取取样桶数,即2~5桶选2桶、6~20桶选3桶、21~50桶选4桶、51~100桶选7桶、101~200桶选10桶、201~400桶选15桶、401桶以上选20桶。按规定从选定的每桶内取出单一油样,再将它们均匀混合成一个油样作为有代表性试验用的油样。

2 取样器具

常用的取油样器具有:从槽车、大罐中取油样用的取样壶,从油桶中取油样用的取样管,从产品内取油样用的由放油接头、医用金属三通阀和透明导油软管组成的密封可靠又能防止污染的取样装置,供采集测定水分含量和油中溶解气体分析用的玻璃注射器,供存放常规试验用油样的避光磨口玻璃瓶等。这些取样器具的规格和技术要求必须符合GB7597—1987的规定。

3 取样操作要点

取油样的器具必须保证清洁、干燥。清洗方法要严格按GB7597—1987取样方法标准和各项试验方法标准中有关采样规定执行。取样前还要将储油容器的取样口认真擦洗干净。开始采样时应利用初取油样冲洗取样器具。从产品内取样时要放掉采样区死角油。取样操作要绝对防止油样受外界污染,防止空气、水分侵入。油样要避光。取样时要排净取样器具内的残余空气,油样进入受样器时防止产生气泡。

4 油样储存与运输

油样采集后应即时试验。若不能即时试验或要异地试验时,油样要密封避光保存。油中溶解气体分析油样不得超过4天,水分测定油样不得超过10天。盛油样容器内油面以上留有足够容纳油样因温度升高体积膨胀的空间。盛油样的注射器,其柱塞与管套应密封良好,又能够随油样体积胀缩而自由滑动,以保证内外压力平衡,达到避免正压破碎和负压吸气吸潮的目的。运输中要防止震荡。

第三节 击穿电压试验

1 水分和杂质对击穿电压的影响

变压器油的国家标准GB2536—1990规定,油厂交货时击穿电压不应低于35kV,而实际上纯净变压器油的击穿电压在60kV以上。这是考虑到包装运输中可能受到水分和杂质污染的结果。水分和杂质都会降低油的击穿电压,水分和杂质共同存在于油中时,会更严重地降低油的击穿电压。有这样一组试验数据证明了这一点:甲油样含水量 $20\mu\text{g/g}$ 、击穿电压37kV;乙油样含水量 $40\mu\text{g/g}$ 、击穿电压34kV。分别用 $5\mu\text{m}$ 精滤器过滤后,含水量未变,而击穿电压甲提高到57kV,乙提高到49kV。滤前数据反映了水分和杂质共存时的影响,滤后数据反映了水分的单一影响。

变压器油有一定的亲水性,会从空气中吸收水分。水在油中的溶解度与温度有关,温度越高,溶解度越高,即越易吸潮。在一定的温度时有一定的饱和溶解度,能否达到饱和溶解度受空气相对湿度影响。在未达到饱和溶解度状态时,会与空气相对湿度之间形成一个平衡溶解度。这个平衡溶解度与同温度下饱和溶解度的比率在数字上等于此时空气相对湿度。水在油中的平衡溶解度即油中的实际含水量 $W(\mu\text{g/g})$ 与空气相对湿度 $\varphi(\%)$ 之间存在这样的关系: $W/W_m=\varphi$ 或 $W=W_m\cdot\varphi$ 。 W_m 为同温度时水的饱和溶解度即最大含水量($\mu\text{g/g}$)。

【举例】已知油在温度为 20°C 、空气相对湿度为70%环境下吸潮达到平衡,求此条件下油中实际含水量 W 。查表(或饱和溶解度与温度关系曲线)得知 20°C 下 W_m 为 $44\mu\text{g/g}$,则 $W=W_m\cdot\varphi=44\times 70\%\approx$

31 μ g/g。

油击穿电压测值是判断油的净化程度的尺度。按JB/T56011—1999标准《油浸式电力变压器产品质量分等》规定,不同电压等级的变压器对油击穿电压有不同要求:35kV及以下变压器为 ≥ 35 kV;63kV~110kV变压器为 ≥ 40 kV;220kV~330kV变压器为 ≥ 50 kV;500kV变压器 ≥ 60 kV。借助不同深度的净化处理使油达到这些要求。

2 击穿电压试验方法

变压器油击穿电压试验方法标准是GB/T507—2002《绝缘油介电强度测定法》。击穿电压是在工频(50Hz)电压下试验,试验电压应是近似正弦波形,峰值因数应在 $\sqrt{2} \pm 5\%$ 范围内。

试验电极分球形和球盖形两种,装于绝缘杯中,两电极距离2.5mm,总称为电极杯。电极杯使用时要经过严格清洗和干燥,并用试样油冲洗至少两遍。试样注入电极杯时要轻轻摇动油样瓶,使油中可能存在的杂质分布均匀,但不得形成气泡。向电极杯注油样要用清洁、干燥的玻璃棒引流,绝对避免产生气泡。确认试样无气泡存在后即可加压试验。

试验在室温下和湿度不大于75%的条件下进行。仲裁试验温度应在15℃~20℃之间。

试验电压从零开始,以2kV/s均匀速度连续升高到两电极间发生第一个放电火花,即为击穿。

试样发生击穿后,在电极之间用清洁、干燥的玻璃棒轻轻搅拌试样以除去击穿产物,但不得形成空气泡。观察试样内确无空气泡,1min后进行下一次加压试验。如无法观察时,则应静置5min后再进行下一次加压试验。如此每个试样进行6次加压试验。以6次击穿电压的算术平均值(kV)作为试验结果报出。试验报告中还应记述使用的电极类型和油温。

油击穿电压测定,推荐采用市场上已有销售的“绝缘介电强度自动测定装置”。它集变压器、调压器、保护装置、电极杯及电压测量仪器于一体,除装卸试样外全自动操作。测定次数、搅拌、静置时间等均可自由设定,测试结果自动显示、自动打印。

第四节 介质损耗因数测量

1 油的介质损耗因数受水分和杂质及测量条件的影响

变压器油的介质损耗因数($\tan\delta$),就是施加于油的交流电压与油中流过的电流之间相位角的余角正切,是由介质极化和电导引起的功率损耗率。纯净的变压器油是由沸点相近的饱和烃类化合物组成的非极性介质。在工频电压下, $\tan\delta$ 值既与电场强度有关,又与温度有关;既受水分、杂质的影响,又受光照的影响。

$\tan\delta$ 测量是非破坏性试验,在较低的电场强度范围内测量时,电场强度对 $\tan\delta$ 测值影响可以忽略不计;但在较高场强下测量时,由于存在电极的二次效应和试样放电会引起测值明显偏大。因此,GB5654—1985规定试验场强在0.03kV/mm~1kV/mm范围内选择。为使测值有可比性,通常是在1kV/mm场强下测量变压器油的 $\tan\delta$ 。

油的 $\tan\delta$ 与油温(绝对温度)的倒数成指数式关系变化。变压器油国家标准规定取油温90℃时的测值作为 $\tan\delta$ 的评价指标。

$\tan\delta$ 测值反映油质的净化程度极为灵敏。油中含有溶解水分、溶解的杂质或胶体微粒和悬浮杂质微粒时,会极大地影响 $\tan\delta$ 值。水分和悬浮杂质可以通过真空过滤脱除。溶解杂质和胶体微粒则必须采用活性吸附剂吸附才能除掉,所以这类杂质对油绝缘性能的危害更甚。

试验和经验证明,光照对油的 $\tan\delta$ 也有明显影响。纯净的变压器油样在阳光下曝晒, $\tan\delta$ 值随曝晒时间的延长而增大。受溶解杂质和胶体微粒污染而 $\tan\delta$ 变大的油样,经阳光或可见光照射后, $\tan\delta$

值会恢复到污染前的水平。

鉴于水分及各类杂质污染和光照射对 $\tan\delta$ 值的不利影响,要求在取油样至进行 $\tan\delta$ 测量的全过程中,对这些不利因素要严格加以避免。

2 $\tan\delta$ 的测量

在 $\tan\delta$ 的测量中,要严格按GB5654—1985《液体绝缘材料工频相对介电常数、介质损耗因数和体积电阻率的测量》的规定执行。试验方法要点是:试验温度准确控制在 $90\pm 1^\circ\text{C}$;试验用电极为三端筒形电极杯或三端平板电极杯;试验施加电场强度为 $1\text{kV}/\text{mm}$;试验用电桥应具有 $10^{-4}\sim 10^{-5}\mu\text{F}$ 的分辨力;温度和施加电压达到规定值后立即进行测量,不可人为地拖延时间,否则将影响测量的真实性;在使用电极杯时必须认真清洗和干燥,并用油样冲洗,同一油样第二次测量时也要冲洗;测量用的油样注入电极杯时不得产生空气泡;取两个有效的测量结果中较小的一个测值作为报告值。测量结果报告中还应记载所用电极杯的类型、施加场强和试验温度,以利测值对比。

第五节 含水量测定

1 测定含水量的意义

在第三节和第四节中叙述了溶解水对油质的危害。水在油中如果达到饱和溶解度后,会因油温的下降发生过饱和形成极微小的水珠弥散在油中,成为弥散态水分。弥散态水分过多时又会聚集成大的水珠与油分离而沉降于油的底部形成积水。随着油温的变化,水在油中存在溶解 \rightleftharpoons 弥散 \rightleftharpoons 沉降三种形态的转换。弥散态水分对油质危害更大,在高压电场下会产生游离放电,可加速油的老化和油中金属件的腐蚀,会使固体绝缘受潮导致绝缘性能下降。充入变压器产品的油,不允许存在弥散态水分,更不允许有沉降水发生。溶解水分也有一定的限量,其上限值能保证在 -40°C 以上的温度范围内不至于发生过饱和而析出弥散态水分。这也是目前把220kV、330kV变压器油含水量限制在 $20\mu\text{L}/\text{L}$ 以下,500kV变压器用油含水量限制在 $15\mu\text{L}/\text{L}$ 以下的理由之一。

开展油中含水量测定,其意义不仅在于油本身,更在于保护油纸绝缘系统的可靠性。

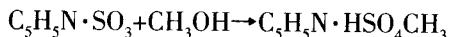
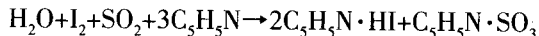
2 含水量测定

含水量测定普遍采用的是国标GB7600—1987《运行中变压器油水分含量测定法(库仑法)》和专标ZB E38004《绝缘油含水量测定法(卡尔·弗休法)》。

两种测定方法都是用 $\mu\text{L}/\text{L}$ 表示油中含水量,相当于 $\text{mgH}_2\text{O}/\text{kg油}$ 。

两种测定方法所依据的化学反应原理是相同的,都是基于卡尔·弗休反应,即油中有水时,碘被二氧化硫还原,在有吡啶和甲醇存在的条件下生成碘氢酸吡啶和甲基硫酸吡啶,油中水分耗尽,反应终止。反应终点通过铂电极反映到终点显示仪上显示出来。两种测定方法,其计算油中含水量的方法不同,库仑法是用油试样所消耗的电解电量计算含水量;卡尔·弗休法用滴定油试样所消耗卡尔·弗休滴定剂的量计算含水量。

测定中所进行的化学反应式为:



对库仑法,含水量 X 按下式计算:

$$X = \frac{Q \times 10^3}{D \cdot V \times 10722}, \mu\text{L}/\text{L} \quad (14-1)$$

式中 Q ——电解油试样消耗的电量, mC;

D ——油试样的视在密度, g/mL;

V ——油试样体积, mL;

10 722——换算常数, $\mu\text{C/g}$ 。

对卡尔·弗休法, 含水量 X 按下式计算:

$$X = \frac{V_1 \cdot T \times 10^{-3}}{m}, \mu\text{L/L} \text{ 或 } X = \frac{V_1 \cdot T \times 10^{-3}}{V \cdot D}, \mu\text{L/L} \quad (14-2)$$

式中 V_1 ——滴定油试样所消耗卡尔·弗休滴定剂的体积, mL;

T ——卡尔·弗休滴定剂的滴定度, $\text{mgH}_2\text{O/mL}$;

m ——油试样的质量, g;

D ——油试样的视在密度, g/mL;

V ——油试样体积, mL。

计算时要将视在密度换算到标准密度。取平行测量两个结果的算术平均值作为含水量测值。

运行中的变压器油水分, 也可以用GB7601—1987规定的“气相色谱法”测定。采用气相色谱仪, 将变压器油中的水分汽化后, 以氮气或氩气为载气, 以高分子多孔微球为固定相进行分离, 用热传导检测器检测, 采用工作曲线法定量, 以 $\mu\text{L/L}$ (体积比)表示含水量。

第六节 外观检验

油品的外观检验是一项最直观的质量检查, 验收油品时它是一个考核项目。在进行其他项目检测前也首先要观察油的外观有无异常现象。新的纯净的变压器油应是淡黄略带微蓝色、清澈、透明, 无可见的悬浮物和机械杂质等任何异物。油中存在弥散状态水分时, 将失去应有的透明度, 颜色也会由黄变白。油中产生老化物时, 随老化程度的加深, 油色逐渐变深、变暗, 逐渐失去透明, 以致出现絮状物和油泥。

对油的外观检验, 国标GB2536—1990《变压器油》规定为目测。取油样置于100mL量筒内, 在 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 下观察, 呈透明、无悬浮和机械杂质为合格。仲裁检验按GB511—1988《石油产品和添加剂机械杂质测定法(重量法)》测定和判断。

第七节 密度测定

变压器油的组分都是沸点相近的石油馏分中饱和烃的混合物。在组分不变、精制程度不变的条件下, 密度应是常量, 只与温度有关。若组分发生较大变化, 有范围外馏分油的存在与混入, 或其他可溶性杂质的大量存在, 都会影响密度值的变化。所以, 测定密度就是用物理的方法来检验油品组成纯度。在进行油的其他试验项目试验时和油应用工程中都需要测定密度的真实值。

变压器油密度, 工程上以 kg/m^3 表示, 也可用 kg/L 、 g/mL 。将 20°C 时的密度规定为标准密度。在任一温度下测得的密度(视在密度)都要换算到标准密度。依据测量时的油样温度和视在密度, 从GB1885—1983《石油产品密度测定法及计量换算表》中查得 20°C 的标准密度。GB/T1884—1992《石油和液体石油产品密度测定法(重量法)》是变压器油密度测定的方法标准。

第八节 运动黏度测定

运动黏度表示流体在重力作用下流动时内摩擦力的量度, 其值为相同温度下液体的动力黏度与其密度之比, 在国际单位制中以 m^2/s 表示, 称为斯(St), 习惯用厘斯(cSt)为单位。1厘斯= $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$

1mm²/s。

运动黏度是变压器油的一项重要的热工指标,它随温度的升高而明显下降。国标GB2536—1990《变压器油》中规定:运动黏度,−30℃时45号油≤1800mm²/s;−10℃时25号油≤200mm²/s;40℃时,45号油≤11mm²/s、25号油≤13mm²/s、10号油≤13mm²/s。

变压器油运动黏度测定的方法是按国标GB265—1988《石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法》。方法的实质是,在指定的恒定温度下,测定一定体积的油样在重力作用下流过一个标定好了毛细管为常数的玻璃毛细管黏度计的时间,黏度计的毛细管常数与流动时间的乘积,即为该温度下油样的运动黏度。

毛细管黏度计以其毛细管内径(从0.4~6.0mm)共分13支,各有自己标定好了的毛细管常数。根据要求的试验温度选用适当内径的毛细管黏度计,以使油样流过时间能在300±180s范围内。若试验温度在0℃以下时,油的流动时间可增加到900s,试验温度在20℃以上时,流动时间可减少到60s。变压器油试验的流动时间,测−10℃、−30℃黏度选取900s,测40℃黏度选取60s。

试验用的恒温浴,能自动控温、自动搅拌均温,恒温精度±0.1℃。指示用温度计最小分度亦应为0.1℃。

油样在试验前应进行过滤和干燥,以除去机械杂质和水分。吸入黏度计之后,油样在黏度计的扩张部分不得产生气泡。在毛细管内不得产生裂隙。一个油样,在一个指定的试验温度下要至少重复4次测定流动时间(单位s),每次的流动时间与4次时间平均值之差符合如下规定测定的时间才算有效,否则需重复测定直至符合规定为止。试验温度40℃时,其差不大于平均值的0.5%;−10℃和−30℃时,其差不大于平均值的1.5%。然后再取其中不少于3次的流动时间的平均值作为油样的流动时间 τ_i (单位s),下角*i*为试验温度。油样运动黏度 ν_i (单位mm²/s)的计算式为 $\nu_i=c \cdot \tau_i$,式中*c*为毛细管黏度计常数(单位mm²/s²), τ_i 为试样的平均流动时间(单位s)。计算结果取4位有效数字。取重复测定两个结果的算术平均值作为油样的运动黏度值。

第九节 闪点(闭口杯法)测定

变压器油闪点,国标GB2536—1990《变压器油》规定其为闭口杯法测定的闪点。闪点是油蒸气与空气的混合气体遇明火瞬间闪火而不能持续燃烧的最低温度。闭口杯法闪点,就是油样在闭口杯内在规定的条件下,加热到它的蒸气与空气的混合气体接触火焰发生闪火时的最低温度。它是变压器油一项安全指标,对变压器产品运行的安全保障十分重要,对环境保护同样重要。油中易蒸发的成分越少,油的闪点越高,安全性亦越佳。国标中规定的闪点温度(闭口杯法),10号油、25号油不低于140℃;45号油不低于135℃。油在变压器产品内处于产品外壳封闭的状态下,所以规定为闭口杯法测闪点。测定方法执行国标GB261—1983《石油产品闪点测定法(闭口杯法)》。

试验是在标准的闭口闪点测定器上进行。在测定器的油杯内加满油样到环形标记线,封闭油杯盖,插入温度计。在连续搅拌下以2~3℃/min恒定升温速率加热。当油样温度到达125℃(45号油)或130℃(10号、25号油)时,每升高2℃进行一次点火试验。点火的火焰要调整到直径3mm~4mm的近似球形。点火时,使火焰在0.5s内降至杯口含油蒸气的空间中停留1s,立即退回原位置。在火焰停留期间若未见发生闪火,则继续每隔2℃按前法进行一次点火试验,直到发生闪火。试验全过程搅拌器一直工作,只有点火时才暂停。当在点火时油面上方最初出现蓝色火焰时,立即读取油样温度作为闪点的测定结果。再重复进行点火试验应能重复闪火。如不重复出现闪火,应更换油样重新试验。只有重复出现闪火,测定结果才认为有效。测定时要记录实际大气压力,并把闪点修正到标准大气压

的温度。取重复测定两个结果的算术平均值作油样的闪点。

油样在试验前含水量 $>500\mu\text{L/L}$ 时,应采用加入新煅烧并冷却的食盐、硫酸钠或无水氯化钙,并在 $50^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 进行干燥脱水,之后取其上层澄清油样作试验。

第十节 凝点、倾点测定

变压器油凝点(倾点)的高低,决定了它的应用地区。变压器产品在安装使用地点不可避免地遇到处于不带电即退出运行的备用状态,这种状态若发生在严寒地区的冬季,当变压器产品内外温度平衡后,平衡温度若到达油的凝点(倾点)温度时,油就会失去流动性,从而失去对流传热的作用,特别是处于变压器外部联管、散热器、冷却器、储油柜内的油因其油量少将会最先出现这种现象。油失去了对流传热和散热作用,变压器就不能立即投入带负荷运行,而需由空载开始随着油流动性的恢复而逐渐增大负荷(以防绝缘产生过热),造成变压器不能应急投入运行。所以,变压器产品选择油品时必须依据产品安装地的最低气温条件选取凝点(或倾点)适宜的品种。目前,通用的变压器油按凝点(或倾点)分为下列三种:45号油,凝点为 -45°C ;25号油,凝点为 -22°C ;10号油,凝点为 -7°C 三种。

1 凝点

凝点就是油样在规定的试验条件下冷却到停止移动时的最高温度,以 $^{\circ}\text{C}$ 表示。其测定方法是:将油样注入凝点测定器的专用试管内,垂直置于冷浴中(温度精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)冷却,到达预期温度时,将油样试管在冷浴中倾斜 45° 并保持1min。观察油面是否产生移动,如有移动,继续冷却直到油面不移动,此时温度作为测定结果。取重复测定的两个结果的算术平均值作为油样的凝点。凝点测定方法执行国标GB510《石油产品凝点测定法》。

2 倾点

倾点是在规定的试验条件下被冷却的油样能流动的最低温度,以 $^{\circ}\text{C}$ 表示。油样是在专用的倾点试验器上进行,将油样装入试验器的专用试管内到达标线,并插入温度计,置于冷浴中冷却,冷浴温度控制精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。冷却至预期温度时,将油样倾斜观察。油样若有流动,则继续冷却。当发现油样不流动时,立即将油样试管水平放置5s。若油面无移动,试验结束。在5s内还有流动,则继续冷却,每降 3°C 重复进行一次试验,直到水平放置5s不再流动为止。油样试管保持水平位置5s且不流动的温度,再加 3°C 作为油样的测定结果。取重复测定两个结果的算术平均值作为油样倾点。

第十一节 界面张力测定

界面张力系油对水的界面张力。测定变压器对水的界面张力,能可靠地指示出亲水化合物在油中的存在。国标GB6541《石油产品油对水界面张力测定法(圆环法)》是标准的测定方法。

油对水界面张力是在标准化的界面张力仪上处于规定的条件下测量的。测量张力仪的周长为40mm或60mm的铂丝圆环从油—水界面向上拉破界面膜所需的力,以 mN/m 表示。在计算界面张力时,所测得的力要用一个经验系数进行修正,此系数取决于所用的力、油和水的密度及铂丝圆环直径与铂丝直径之比。测量必须在严格、标准化的非平衡条件下进行,即在油—水界面形成后1min内完成测定。

测定前要过滤油样并测定 25°C 时密度。油样和水在测量杯内应保持 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$,在此温度测定油—水界面张力。油—水界面形成后保持 $30\pm 1\text{s}$ 开始测定,并在 $30\pm 1\text{s}$ 内完成铂丝圆环破裂油—水界面膜,即保证在油—水界面形成后1min内完成界面张力测量。油样的界面张力 δ 用 mN/m 表示,按式14-3计算:

$$\delta = MF \quad (14-3)$$

式中 M ——膜破裂时仪器指示数, mN/m;

F ——系数, 按式14-4计算。

$$F = 0.725 \, 0 + \sqrt{\frac{0.036 \, 78 M}{r_y^2 (\rho_0 - \rho_1)}} + P \quad (14-4)$$

$$P = 0.045 \, 34 - \frac{1.679 r_w}{r_y} \quad (14-5)$$

式中 ρ_0 ——水在25℃时的密度, g/mL;

ρ_1 ——油样在25℃时的密度, g/mL;

P ——常数, 按式14-5计算;

r_w ——铂丝的半径, mm;

r_y ——铂丝环的平均半径, mm。

取重复两个测定结果的算术平均值作为油样的界面张力值。

第十二节 酸值测定

变压器油尽管在油厂经过了严格的精制, 但仍存在标准允许的残余微量酸性成分。运行中因正常氧化或故障引起的异常氧化也会生成新的酸性成分。油中的酸性成分对油的击穿电压、介质损耗因数、体积电阻率等指标有劣化影响。因此, 新油和运行油都应在需要的时候进行酸值测定, 测定结果作为常规考核或油质评价的判据。

变压器油酸值用中和1g油中的酸性成分消耗氢氧化钾毫克数表示, 单位是mgKOH/g。对酸值的指标, 国标规定新油不大于0.03mgKOH/g, 运行油不大于0.1mgKOH/g。

酸值测定方法, 国标GB2536—1990规定新油采用GB264《石油产品酸值测定法》, 国标GB7595—1987规定运行油采用GB7599《运行中变压器油、汽轮机油酸值测定法(BTB法)》。这两种方法实质上是一致的, 都是用标准浓度的KOH滴定液中和油中酸性成分, 滴定至中和反应终点, 用消耗KOH数计算酸值。所不同的是使用的指示反应终点的指示剂不同。GB264规定用碱性蓝6B或甲酚红作指示剂, GB7599规定用溴百里香草酚蓝(BTB)作指示剂。

测定程序两种方法也基本相同, 即称取8g~10g油样, 加入无水乙醇后, 回流加热煮沸5min抽取油中酸性成分。在有指示剂存在的条件下, 用标准浓度的KOH-C₂H₅OH溶液滴定油样乙醇液至中和终点。以滴定所消耗的KOH-C₂H₅OH液体积毫升数计算油样酸值。为了消除无水乙醇中极微量酸性成分对测定结果的影响, GB264规定预先用KOH-C₂H₅OH标准溶液中和无水C₂H₅OH至中性点, 其酸值按下式计算:

$$X = \frac{VT}{G} \quad (14-6)$$

式中 X ——油样酸值, mgKOH/g;

V ——滴定时消耗的KOH-C₂H₅OH液体积, mL;

T ——KOH-C₂H₅OH液的滴定度 ($T=56.1N$, N 为KOH-C₂H₅OH液的当量浓度), mgKOH/mL;

G ——油样的质量, g。

GB7599则规定用空白无水C₂H₅OH试样作平行试验来修正酸值计算结果。酸值按下式计算:

$$X = \frac{(V_1 - V_0) \times 56.1C}{G} \quad (14-7)$$

式中 V_1 ——滴定油样消耗的KOH-C₂H₅OH液体积, mL;
 V_0 ——滴定空白乙醇样消耗的KOH-C₂H₅OH液体积, mL;
 56.1——KOH的分子量;
 C ——KOH-C₂H₅OH液的当量浓度, mol/L。

两种方法都是取重复测定两个结果的算术平均值作为油样的酸值。

第十三节 氧化安定性测定

氧化安定性是变压器油抵抗大气(或氧气)的作用而保持其性质不发生永久变化的能力。氧化安定性佳,运行中或储存中氧化进程就慢,不进行再生处理的运行时间就会拉长,对于降低变压器产品的运行成本具有重要意义。这项指标只对考核新油适用,运行油不考核此项指标。

变压器油氧化安定性测定,采用的专业标准SH/T 0206—1992《变压器油氧化安定性测定法》。试验是将过滤后的油样25±0.1g装入标准化的专用的氧化管内,管内加入铜催化剂,置于110℃±0.5℃的热油浴中,通入经干燥净化的17±0.1mL/min平稳流量的氧气,连续氧化164h后,测定其氧化沉淀物的含量和酸值,并以此测值表示油样的氧化安定性。

试验的铜催化剂是直径为1.00mm~1.02mm、长30.5±0.1cm的铜线卷成外径为19±1mm、长50mm的螺旋式管状弹簧。测定中使用的氧气纯度为≥99.2%。

氧化结束后,取出氧化管暂放在干燥、清洁的暗处冷却1h后,油样倒入带塞锥形瓶。用大约200mL石油醚彻底洗涤氧化管、氧气导管及催化剂铜螺旋管上的残油至无油迹。将洗油的石油醚与油的混合液并入油样锥形瓶,加塞在室内暗处静置24h,备测酸值用。

再将洗至无油迹的氧化管、氧气导管及铜催化剂管用苯—乙醇混合液溶解其表面沉淀物之后,将此溶解液移入恒重好了的100mL锥形烧瓶中,放在水浴中将苯—乙醇蒸干,再在105℃±5℃温度下烘至恒重;把已静放24h的油样和洗涤溶剂的混合液,用带滤纸的玻璃漏斗滤入500mL量筒中,再用石油醚冲洗油样烧瓶和滤纸至无油迹止,将此洗液也滤入500mL量筒中,稀释到刻度供酸值测量用;再把滤纸及锥形烧杯上的氧化沉淀生成物用苯—乙醇混合液溶解后移入恒重好了的锥形瓶内,在水浴中蒸掉苯—乙醇后,在105±5℃下烘至恒重。按下式计算油氧化沉淀物 x (%):

$$x = \frac{m_1 + m_2}{m} \times 100 \quad (14-8)$$

式中 m ——油样的质量, g;
 m_1 ——油样中沉淀物的质量, g;
 m_2 ——氧化管等壁上沉淀物的质量, g。

测定氧化后酸值的步骤是,从500mL量筒内取出50mL氧化油样与石油醚的混合试液,注入250mL锥形瓶内,再加入50mL苯—乙醇混合液、0.5mL碱性蓝6B指示剂,用KOH-C₂H₅OH标准液滴定至终点(颜色突变时)读取KOH-C₂H₅OH液消耗的mL数;同时取50mL石油醚和50mL苯—乙醇混合液作空白酸值测定。氧化后酸值 A (mgKOH/g)按下式计算:

$$A = \frac{T(V - V_1)n}{m} \times 10^3 \quad (14-9)$$

式中 T ——KOH溶液的滴定度, gKOH/mL;

V ——滴定时消耗的 $\text{KOH}-\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 标准液体积, mL;

V_1 ——滴定空白溶液消耗 $\text{KOH}-\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 标准液体积, mL;

n ——全部氧化油和石油醚混合液与滴定用溶液的体积比;

m ——油样的质量, g。

氧化后沉淀物含量和酸值, 各取重复测定两个结果的算术平均值作为油样的测试结果。

第十四节 油中溶解气体分析

1 油中溶解气体分析的必要性

在正常运行情况下, 油浸式变压器产品内部绝缘材料如油、纸等老化速率非常低, 油中溶解气体出现速率也很低; 一旦变压器产品内出现了潜伏性热故障或放电故障, 变压器油就会因不同的故障点温度而分解出不同的烃类气体。如故障涉及到了固体绝缘, 又可分解出 CO 、 CO_2 气体, 逐渐溶解于油中形成油中溶解气体。故障发展得越快、越严重, 产气速率越高, 故障气体种类也越典型。有计划地进行油中溶解气体分析, 可以及早发现产品内部的故障隐患, 可随时掌握故障发展趋势, 对故障作出较为准确的判断, 有利于采取对策。

此项分析检测并不是针对油品设定的考核项目, 而是通过对油品检验来间接地监测变压器产品内在质量的检测项目。不仅对运行中变压器要进行有计划的跟踪监测, 在变压器制造过程中也要进行几次油中溶解气体分析。例如, 为了监测大型变压器有无铁心多点接地或短路, 有无漏磁通引起的局部过热, 有无放电等潜伏性故障。在产品长期空载试验前后, 温升试验前后, 油流静电试验前后都要求取油样进行油中溶解气体分析, 以比较试验前后测值有无变化, 或分析变化特点, 以利将故障隐患消除在产品出厂之前。

2 油中溶解气体分析方法

油中溶解气体分析是在标准化的气相色谱仪上进行的。其试验方法标准及如何应用分析结果判断故障, 由国标GB7252—2000《变压器油中溶解气体分析和判断导则》作出了规定。

油中溶解气体分析的大过程是从产品内取油样→脱出溶解气体→取气样注入色谱仪→气样被载气送至色谱柱进行组分分离→分离后的单组分气样依分离顺序先后送入检定器, 并依次产生各自的讯号→讯号放大后由记录器自动打印色谱图(放大讯号对时间轴所作的曲线)→根据色谱图计算单组分气体含量, 以 $\mu\text{L/L}$ 表示(修正到 20°C 、 $101\,325\text{Pa}$ 标准状态下的气体体积与油样体积之比)。

用于判断变压器故障的有价值的气体组分是甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、乙烯(C_2H_4)、乙炔(C_2H_2)、氢(H_2)、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)。

运用试验结果进行产品故障分析。首先利用特征性气体初步判断变压器产品有无潜伏性故障。变压器无潜伏性故障, 运行正常的情况下, 油中只有 CO 、 CO_2 气体, H_2 含量应在几 $\mu\text{L/L}$ 至几十 $\mu\text{L/L}$ 的数量级之内, 总烃应在痕迹量或几 $\mu\text{L/L}$ 范围内, 而且产气速率在较长运行期间内几乎是零。在油纸绝缘中存在局部放电时, 油中分解出的特征性气体是 H_2 和 CH_4 。油分解气体的种类和数量与故障点温度有关。故障点温度高于正常运行温度不多时, 分解出的主要特征气体是 CH_4 ; 温度再升高, 主要特征性气体是 C_2H_4 、 C_2H_6 ; 高于 $1\,000^\circ\text{C}$ 的过热, 分解出的气体将含有较多的 C_2H_2 。如故障涉及到固体绝缘, 将伴生较多的 CO 和 CO_2 气体。故障类型与特征气体组分关系归纳列于表14-1。

有的变压器产品内并不存在故障, 却发现油中存在不应有的气体。如: 由于产品带油情况下进行油箱壁补焊作业会在油中产生 C_2H_2 、 CH_4 ; 油净化处理加热温度过高或加热元件表温过高而脱气

表14-1 故障类型与特征气体组分关系

序 号	故障类型	主要气体组分	次要气体组分
1	油过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄	H ₂ 、C ₂ H ₆
2	油和纸过热	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO、CO ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
3	油纸绝缘中局部放电	H ₂ 、CH ₄ 、C ₂ H ₂ 、CO	C ₂ H ₆ 、CO ₂
4	油中火花放电	C ₂ H ₂ 、H ₂	
5	油中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆
6	油和纸中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO、CO ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆
7	进水受潮或油中气泡	H ₂	

程度又不够,也会残留CH₄和C₂H₄。

在油中溶解气体分析中,常用总烃含量监测产品是否存在内部异常。总烃含量指CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂四种烃含量之和。为叙述方便,又常把CH₄称为C₁,把分子中有2个C原子的烃称为C₂。在分析判断事故时所用的C₂则指C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂三种烃。

为不失时机地初判潜伏性故障的存在,规定了变压器产品对油中溶解气体绝对含量的注意值(可理解为警戒值)。具体规定如表14-2所示。

仅仅根据气体组分含量的多少,对故障的有无和性质往往难于作出肯定的判断,还应考察特征气体的增长趋势,即考虑气体产生的速率来验证初判断。有两种考察气体产生速率的方式:绝对产气速率和相对产气速率。

(1)绝对产气速率,即每个运行小时产生某种气体的平均值。按下式计算:

$$r_a = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{\Delta t} \cdot \frac{G}{\rho} \quad (14-10)$$

式中 r_a ——绝对产气速率,mL/h;

C_{i2} ——第二次取样测得油中某气体含量,μL/L;

C_{i1} ——第一次取样测得油中某气体含量,μL/L;

Δt ——两次取样间隔中实际运行时间,h;

G ——产品内总油量,t;

ρ ——油的密度,t/m³。

用绝对产气速率判断变压器、电抗器总烃产气速率的注意值是:开放式储油柜为0.25mL/h;隔膜式储油柜为0.5mL/h。

(2)相对产气速率,即每个运行月(或折算到月)某种气体含量增加到原有值的百分数的平均

表14-2 油中溶解气体含量注意值^①

产 品	气体组分	含 量/μL·L ⁻¹
变压器、电抗器	总烃(C ₁ +C ₂)	150
	C ₂ H ₂	5
	H ₂	150
互感器	总烃(C ₁ +C ₂)	100
	C ₂ H ₂	3
	H ₂	150 ^②
套 管	CH ₄	100
	C ₂ H ₂	5
	H ₂	500 ^③

①注意值不是划分产品有无故障的唯一标准。气体含量达到注意值时,应进行跟踪分析,查明原因。

②、③影响电流互感器、电容式套管中含氢量的因素较多,有的氢含量虽低于表中值,若增长较快,也应引起注意;有的氢含量虽超过表中值,若无明显增长趋势,也可判为正常。

值。按下式计算：

$$r_r = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{C_{i1}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \times 100\% \quad (14-11)$$

式中 r_r ——相对产气速率，%/月；

C_{i2} ——第二次取样测得油中某气体含量， $\mu\text{L/L}$ ；

C_{i1} ——第一次取样测得油中某气体含量， $\mu\text{L/L}$ ；

Δt ——两次取样间隔中实际运行时间，月。

用相对产气速率判断变压器产品内部有无故障隐患，若总烃的相对产气速率大于10%/月时应引起注意。对于总烃起始含量很低的产品不宜采用此方法。

利用气体组分三比值判断故障性质。将 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 五种特征气体组成三对比值，每对比值在一定范围内赋予一个编码，再将三比值的各个编码按规律组成不同的编码组合，分别指示不同的故障性质。通常将这种判断事故性质的方法称之为三比值法。三比值法的编码规则和判断故障方法分别列于表14-3和表14-4。

表14-3 三比值法的编码规则

三对特征 气体比值 范围	比值范围编码			说 明
	$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$	$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$	
<0.1	0	1	0	例如： $\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}=1\sim3$ 时，编码为1 $\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}=0.1\sim1$ 时，编码为0 $\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}>3$ 时，编码为2
0.1~1	1	0	0	
1~3	1	2	1	
>3	2	3	2	

表14-4 判断故障性质的三比值法

序号	故障性质	比值范围编码			典 型 举 例
		$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$	$\frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$\frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$	
0	无故障	0	0	0	正常老化
1	低能量密度的局部放电	0 ^⑤	1	0	含空气腔中的放电，这种空气腔是由于不完全浸渍、空气过饱和、空吸作用或高湿度等因素造成的
2	高能量密度的局部放电	1	1	0	同上，但已导致固体绝缘的放电痕迹或穿孔
3	低能量的放电 ^①	1~2	0	1~2	不同电位的不良连接点间或者悬浮电位体的连续火花放电。固体材料之间油击穿
4	高能量放电	1	0	2	有工频续流的放电，绕组、线饼、线匝之间或绕组对地之间油的电弧击穿。有载分接开关的选择开关切断电流
5	低于150℃的热故障 ^②	0	0	1	通常是包有绝缘的导线过热
6	150℃~300℃范围的热故障 ^③	0	2	0	由于磁通集中引起的铁心局部过热，热点温度以下述情况为序而增加：铁心中的小热点，铁心短路，由涡流引起的铜过热，接头接触不良（形成焦炭），铁心和外壳的环流
7	300℃~700℃范围的中等温度热故障	0	2	1	
8	高于700℃范围的高温热故障 ^④	0	2	2	

①随火花放电温度的增长，特征气体比值有如下增长趋势： $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 比值从0.1~3增加到3以上； $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 比值从0.1~3增到3以上。

②这一情况中，气体主要来自固体绝缘的分解，这说明了 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 比值的变比。

③这种故障情况通常由气体浓度的不断增加来反映。 CH_4/H_2 比值通常大约为1，实际值大于或小于1与很多因素有关，如油保护方式、实际的温度水平和油的质量等。

④ C_2H_2 含量的增加，表明热点温度可能高于1000℃。

⑤ C_2H_2 和 C_2H_4 的含量均未达到应引起注意的数值。

3 判断故障的步骤

运行中的变压器产品,首先将气体分析结果中的总烃、甲烷、乙炔、氢这四个主要数据与表14-2列出的注意值作比较,还要注意产气速率的比较,若短期内各种气体含量迅速增加但并未超过表14-2中的数值,也可判为产品内部有异常状况;有的产品因某种原因造成气体含量基值较高,超过表14-2数值但增长速率很低,仍可认为产品正常。

当认为产品内部有故障后,可用三比值法对故障的类型作出判断。

根据三比值法判断结果,结合对产品的其他检查性试验(如测绕组的直流电阻、空载特性试验、绝缘试验、局部放电量测量、水分测量等)的结果,以及产品的结构、运行、检修等情况,综合分析判断故障的性质和部位。针对不同情况对产品采取不同的处理措施,如缩短色谱分析周期,加强监视,限制负荷,近期安排内部检查或立即停止运行等。

还应指出,当变压器内部故障涉及到固体绝缘时, CO 、 CO_2 有明显增长。正常老化过程中 CO 比 CO_2 增长得快,但规律不明显。运行油中 CO 一般在 $300\mu\text{L/L}$ 以下,若总烃含量超过正常范围, CO 超过 $300\mu\text{L/L}$ 且其产气速率又快时,应考虑到涉及固体绝缘过热的可能;若 CO 虽超过 $300\mu\text{L/L}$,但总烃含量正常,仍可认为产品正常。

新变压器出厂前即使有潜伏性故障,也难用三比值法判别。因试验条件与产品运行条件(工况)不等效,该有的特征气体组分来不及产生出来,尚不能形成建立三比值的条件。因而,只能从有无特征气体出现,及出现的气体组分来判断是否有潜伏性故障的可能性或属哪类潜伏性故障的可能性。它的参照基准是各种特征性气体都应该是零或痕迹量, CO 、 CO_2 均在 $300\mu\text{L/L}$ 以下的正常产品。

第十五节 与固体材料相容性试验

变压器油与在油中(或接触油)工作的固体材料共存于一个有机整体,担负着完成变压器产品功能的任务,它们之间应是相辅相成、相佐成器的关系,而不许相互排斥、互不相容。这就是要进行变压器油与固体材料相容性试验的理由。尽管油、固体材料作为单一体都是符合各自技术标准的优质材料,但不一定各个都能通得过相容性试验这一关。这项试验属工艺试验性质,当改变变压器油品牌或常用品牌的油的原油产地、油厂及炼油工艺有改变时,都要用油与在用的固体材料做相容性试验;当油的品牌未变而与油接触的固体材料全部或个别改变时,也要做与油的相容性试验。试验时,若是油变固体材料未变,要做油与全部固体材料的相容性试验;若油不变而材料改变,既要做油与全部固体材料的、也要做改变了的单一材料与油相容性试验,而且最好先做单一材料与油的相容性的优选性试验,认为油与预选材料相容之后,再作全部材料的相容性试验,以避免浪费其他材料和油。

固体材料指变压器产品与变压器油直接接触或不可避免与油短时接触(如外表涂层材料)的各种材料。这里主要指导磁材料、导电、带电材料、各种绝缘材料、浸渍材料、涂(镀)层材料、金属和非金属结构材料、密封材料等。

相容性试验方法及相容性试验结果的判断标准,目前我国尚未形成国家标准或专业标准。为此,建议试验时,根据变压器产品对材料的具体要求和实际的油与材料之间的使用比例,参照美国ASTM D3455—89《结构材料和由石油提炼的电气绝缘油的相容性试验方法》制定自己的试验方案。试验方案至少应包括以下内容:

(1)拟做相容性试验的油和固体材料,都应符合各自的标准和变压器对它们除相容性而外的所有使用要求,在此前提下才可进行相容性试验。

(2)油与固体材料比例的确定。应适当加大固体材料的试验用量,至少加大到实际使用比例的4倍为宜,以收到模拟和加速试验的效果。如没有特殊要求,推荐参照ASTM D 3455的规定:油试样以800mL为基数,固体材料,可以测量表面积的试样取不小于52cm²;不能测量表面积的试样取油样质量的1%;油漆涂料和浸渍材料应按其材料试验方法规定的样件制作方法制作后,取1300cm涂层(不一定按ASTM D 3455规定涂在纸或铝箔上),以利试验后检测涂层的性能;硅钢片和硅钢片上涂绝缘漆的试样取6200cm²;漆包线、裸导线取1300cm²表面积;密封材料试样取65cm²表面积。

(3)试验温度的确定。推荐采用100±1℃(ASTM D 3455规定),或105±1℃(此温度符合油浸式A级绝缘变压器允许的工作温度)。

(4)试验时间的确定。推荐在规定的试验温度下,经受164h。这个试验条件与油氧化安定性试验基本一致,所差的是不通氧气和催化剂用量较多,以利于试验后对油的鉴别。

(5)试验注意事项,油和固体材料应同加于一个广口玻璃容器内(为排除对油的影响),油面上留有试样体积膨胀的足够空间,加盖封严(但在升温阶段留有缝隙以保持内外压力平衡,保温计时开始时再封严),容器置于大珐琅盘上再移入烘箱,以防油溢落到烘箱内。固体试样入油前要经过4h干燥(ASTM规定为16h)。

(6)在同条件下置空白油样,做对比试验。

(7)试验结果判断。因无统一标准,要根据具体情况确定判断方法。推荐至少应作如下考虑。

①油应设定酸值、击穿电压、 $\tan\delta$,必要时可设体积电阻率、界面张力、含水量或其他检测项目。这些项目试验后的测定结果、与对比试验的空白油测定结果相比,其平行差值,以不大于油试验标准中规定的相应项目测定结果平行偏差的1倍为宜。

②固体试样应设定表面状态、形状、尺寸等外观检验项目以及硬度、脆性、增重失重、抗拉抗压强度、抗弯强度等物理测定项目。涂层材料还可按漆膜试验的标准方法进行膜层弹性、附着力等项目测定。检测项目可根据具体需要随机确定。检验和测定的结果与材料标准相比及与相容性试验前基准状况相比,无定量指标的项目,应该无变化,如不黏、不软、不脆、不破裂、不起皱、不脱落、不变形、尺寸稳定等;有定量指标的项目,测值仍应符合各自材料标准规定的指标值,如有降低也要视使用要求限定一个较小的允许偏离标准值的百分率。

只有符合设定检测项目及判断标准的油或材料,才认为油—固体材料是相容的,它们是可用的。

第十五章 温升试验

第一节 概 述

变压器在额定频率的额定电压下带负载运行时,铁心内的磁通在硅钢片内产生磁滞损耗和涡流损耗,称之为空载损耗。流过绕组的负载电流在绕组的电阻上所产生的损耗(I^2R),电流产生的漏磁通在其经过的金属件上所产生的涡流损耗,统称为负载损耗。空载损耗和负载损耗在铁心、绕组及金属结构件中将转化为热,并将热散发到油浸式变压器的油中,借助于油通过不同的循环方式再将热散到空气中。对于干式变压器,则直接将热散发到空气中,从而达到散热目的,最终达到热平衡。

油浸式中小型(部分大型)变压器的散热是通过油的自然循环将热量带离发热点,再通过油箱和装在油箱上的散热装置将热散发到空气中,这种冷却方式称之为自然冷却。当变压器容量增大,自然冷却方式的冷却装置过于庞大或根本无法满足冷却要求时,在冷却装置上加装吹风装置,以增加冷却效应,这种冷却方式称之为自然循环风冷。而特大容量的变压器则必须采用强迫油循环风冷或水冷的冷却器。

变压器温升试验的目的是要验证变压器的冷却能力,能否将总损耗所产生的热量散发出去,达到热平衡时,使变压器顶层油和绕组(平均)高于冷却介质的温升不超过规定的限值同时还要通过红外扫描、油的色谱分析观测电路联结点、铁心及结构件、油箱及磁屏蔽等是否有局部过热。

第二节 连续额定容量下的稳态温升限值

温升限值是变压器特性参数之一,是工厂的保证值,不允许有正偏差。

1 正常使用环境条件

海拔高度:不超过1 000m;

最高气温: +40℃;

最高月平均温度: +30℃;

最高年平均温度: +20℃;

最低气温: -25℃(适用于户外变压器);

最低气温: -5℃(适用于户内变压器);

水冷却器进水口处冷却水最高温度: +25℃。

2 油浸式变压器的温升限值

油浸式变压器(字母代号为O)在连续额定容量稳态下的温升限值按GB1094.2—1996规定如下。

顶层油温升:

油不与大气直接接触的变压器 60K

油与大气直接接触的变压器 55K

绕组平均温升(用电阻法测量) 65K

对于铁心、绕组外部的电气连接线或油箱中的结构件,不规定温升限值,但仍要求温升不能过

高,通常不超过80K,以免使其相邻的部件受到热损坏和使油过度老化。对于大型变压器,可通过特殊试验进行探讨。

GB1094.2—1996采用说明:

按变压器运行要求,对此限值的规定与IEC—76有所不同,IEC76.2对限值规定如下:

顶层油温升 60K

绕组平均温升

对ON或OF标志的变压器 65K

对OD标志的变压器 70K

对铁心、绕组外部的电气连接线或油箱中的结构件,不规定温升限值,但对该值的要求仍不能过高,以免使与其相邻的部件受到热损坏或油过度老化。

3 干式变压器的温升限值

表15-1列出了干式变压器的温升限值。

表15-1 干式变压器的温升限值

1	2	3
部位	绝缘系统温度/℃	平均温升/K
绕组	105(A)	60
	120(E)	75
	130(B)	80
	155(F)	100
	180(H)	125
	220(C)	150
铁心、金属部件与其相邻的材料		在任何情况下,不会出现使铁心本身、其他部件或与其相邻的材料受到损害的温度

注:1.第二栏中的字母是表示绝缘材料的温度等级;

2.用电阻法测量温升。

第三节 特殊使用条件下对温升限值的修正要求

国标GB1094.2—1996规定当安装场所条件不符合正常使用环境条件的要求时,则对变压器的温升限值应作相应修正。

1 油浸空气冷却式变压器

1.1 对安装场所的环境温度条件的修正

安装场所的环境温度若最热月的平均温度超过+30℃,年平均温度超过+20℃,当其中之一超过规定的温度时,则对变压器的温升限值应按超过部分的数值减少,并应修约到最接近温度的整数。

1.2 对安装场所海拔高度条件的修正

安装场所海拔超过1 000m,试验场地低于1 000m时(也要折算),自冷(AN)变压器绕组平均温升限值应按海拔每增加400m降低1K来计算;风冷式(AF)变压器应按海拔每增高250m降低1K来计算。

当试验场地海拔高于1 000m,安装场所却低于海拔1 000m时,应对相应温升限值的增加值进行修正。

因海拔高度而作的温升修正值,均应修约到最接近的温度的整数。

因冷却介质温度高或因安装场所海拔高而将变压器的规定温升限值降低时,应在铭牌上标明。

2 油浸水冷却式变压器

冷却水的温度超过+25℃,变压器的温升限值应按冷却水温度超出+25℃的部分减小,并修约到最接近的温度整数。

3 干式变压器

3.1 为较高的环境温度或为特殊空气冷却条件而设计的变压器的温升降低值

如果变压器是按正常环境条件设计的,当冷却空气温度超过了最高值中的任意一项,但不超过

10K时,则绕组温升按下述情况降低;

当超过的温度等于或小于5K时,应降低5K;

当超过的温度大于5K或等于、小于10K时,应降低10K。

当超过10K时,其允许温升由供需双方商定。

3.2 为高海拔设计的变压器温升的降低值

海拔高度超过1 000m运行,但仍在正常海拔高度进行试验的变压器,温升限值须相应递减,每超过500m为一级,温升按下列数值减小:

自冷式变压器 2.5%

风冷式变压器 5%

如果海拔每升高1 000m,温度降低5K或更多时,温升限值将不予校正。

如果运行地点海拔低于1 000m,而试验地点海拔高于1 000m时,测得温升值按每超过500m为一级,按上述规定值降低。

第四节 油浸变压器的温升试验方法

1 施加负载的方法

国标GB1094.1—1996规定:测量油浸式变压器的稳态温升的标准方法是短路接线的等效试验法。此法通常是将被试品被试一对绕组的低电压侧的出线端子短路,对高压侧供电,供给实测总损耗,以测定变压器顶层和底部油的温升。然后供额定电流测定绕组的平均温度和油的平均温度,求得绕组对油的平均温升,即铜油温差。由铜油温差加上总损耗下油的平均温升计算额定频率、额定电压下该绕组流过额定电流时的平均温升。

特殊情况下,国标GB1094.2—1996规定温升值的测量也可按协议对适当的负载施加额定频率的额定电压使绕组中流过等于或接近额定电流,这种方法叫直接负载法。该方法只适用于小型变压器。也可协议采用第三种方法,相互负载法,也称反馈负载法:选用两台变压器并联,一台是被试品,对被试品施加额定频率的额定电压,通过调节第2台变压器的电压比或采用另外输入电压的方法,使被试变压器被试绕组中流过额定电流。

对于油浸变压器多采用短路法。下面重点对短路法加以介绍。

此法分两个试验阶段,也可合成一个阶段进行试验。

1.1 施加总损耗——第一试验阶段

对试品施加总损耗(额定频率、额定电压下实测的空载损耗和额定负载下折合到75℃时的实测负载损耗之和)。此阶段是测定顶层油温升和油的平均温升。此时因绕组中电流高于额定电流,因而绕组温升相应增高。

试验需连续进行,定时监测各部位油的温度和冷却介质温度,直到油的温升稳定为止。油温升稳定的标志是:当试验进行到顶层油的温升变化小于每小时1K,并维持3h之后,可认为温升已达到稳定。取最后1h内的平均值作为试验结果值。若变压器的热容量(主要是油),也就是热时间常数不超过3~4h(一般在1~5h,较小的值适用于结构紧凑的大容量强油循环冷却的变压器,较大值适用于自冷式变压器),则偏离稳态温升 $\Delta\theta_u$ (油)的剩余偏差(或称截尾误差)可以忽略不计。按GB1094.2—1996附录C,剩余偏差:

$$\varepsilon(t) = \Delta\theta_u \cdot e^{-t/T_0} \quad (15-1)$$

式中 T_0 ——反映整个变压器热容量的热时间常数, h;

t ——连续进行试验的时间, h;

$\Delta\theta_u$ ——顶层油稳态温升, K(见图15-1)。

通常在不采取降低冷却能力和提高输入损耗以缩短试验时间的情况下, 强油循环冷却的大型变压器 $t=12\text{h}\sim 14\text{h}$, 自冷式变压器 $t=20\text{h}\sim 28\text{h}$ 。顶层油稳态温升在变压器计算时控制在: 强油循环冷却的变压器 $\Delta\theta_u=35\text{K}\sim 40\text{K}$, 自冷式变压器 $\Delta\theta_u=50\text{K}$ 。取强油循环冷却的变压器 $T_0=2.5\text{h}$, 自冷式变压器 $T_0=4\text{h}$, $t/T_0=5\sim 6$ 倍, 因此, 截尾误差为:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \Delta\theta_u \cdot e^{-(5-6)} \\ &= \Delta\theta_u \cdot (0.00674 \sim 0.00248)\end{aligned}$$

强迫油循环变压器取 $\Delta\theta_u=40\text{K}$, 则

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= 40 \times (0.00674 \sim 0.00248) \\ &= (0.27 \sim 0.1)\text{K}\end{aligned}$$

自冷式变压器取 $\Delta\theta_u=55\text{K}$, 则

$$\varepsilon(t) = 55 \times (0.00674 \sim 0.00248) = (0.37 \sim 0.15)\text{K}$$

可知当 $t/T_0=5\sim 6$ 倍时, 剩余偏差 $<0.5\text{K}$; 当 $t/T_0=4$ 时, 则不超过 1K 。

1.2 施加额定电流——第二试验阶段

施加总损耗试验阶段结束, 测定各部位油温度和冷却介质温度之后, 立即将输入绕组中的电流降至额定电流, 继续试验1h, 并继续观测各部位油温度和冷却介质的温度。

施加额定电流1h结束, 记录好各部位油温和冷却介质温度之后, 应迅速把电流降至最小, 切断电源, 断开试品与中间升压变压器间联线, 测量热电阻。也可以在不切断电源的情况下, 采用在绕组负载上叠加一低值直流的方法测定绕组直流电阻, 即带电测量法。

在施加额定电流的1h内, 油的温升有所下降, 故绕组温度值应加上油平均温升的这一下降值, 再减去总损耗试验阶段结束时冷却介质的温度, 即为绕组平均温升。另一计算的方法是: 额定电流下绕组平均温度减去油的平均温度得到铜油温差, 铜油温差加上第一试验阶段的油平均温升得绕组平均温升。

1.3 将两个试验阶段合并的试验方法

国标GB1094.2—1996规定: 可以施加与规定总损耗之差为 $\pm 20\%$ 的损耗和与额定电流之差为 $\pm 10\%$ 的电流进行试验。例如, 在施加90%总损耗, 绕组中电流为105%额定电流的状态下进行试验, 当顶层油温升稳定后, 停电测量绕组电阻, 此时测得的顶层油温升、油平均温升和绕组平均温升应按下式进行校正。

(1) 高于环境温度的油的温升应乘以校正系数, 即

$$\left(\frac{\text{校正到 } 75^\circ\text{C 的实测总损耗}}{\text{试验实加损耗}} \right)^x$$

式中 $x=0.8$, 对配电变压器(自然冷却, 最大额定容量 2500kVA);

$x=0.9$, 对ON冷却方式且额定容量 $>2500\text{kVA}$;

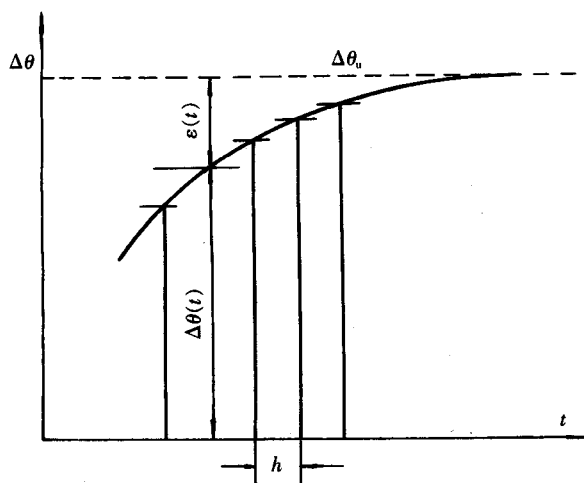


图15-1 用图解外推法来计算最终温升

$\Delta\theta(t)$ ——时间 t 时油的温升值

$\varepsilon(t)$ ——时间 t 时, 偏离稳态温度的剩余偏差

h ——两次读数间时间间隔

$x=1.0$,对OD(国标原文为“ON”,对应于 $x=0.9$ 及 $y=2.0$ 分析不应是ON,应是OD)或OF冷却方式的变压器。

(2)高于油的平均温度的绕组平均温升(即铜油温差)应乘以校正系数:即

$$\left(\frac{\text{额定电流}}{\text{试验电流}} \right)^y$$

式中 $y=1.6$,对ON和OF冷却方式的变压器;

$y=2.0$,对OD冷却方式的变压器。

2 温度的测定方法及温升计算

2.1 外部冷却介质温度的测定

2.1.1 冷却空气的温度

应注意使冷却空气温度变化尽量小,特别是在后期接近稳定阶段时,应采取适当措施防止空气湍流引起剧烈的温度变化。温度传感器要放在具有合适时间常数(约2h)的吸热容器(例如容积约1 000mL的充油金属罐)的中央位置。

温度传感器应沿油箱周围布置,距油箱或冷却装置1m~2m,应避免直接受到热辐射。其数量不少于3个,取其读数的平均值。每隔一定时间(如0.5h)记录一次读数,或采用自动记录仪记录冷却空气的温度。

自冷式(AN)变压器周围的温度传感器,应放在冷却面高度一半的位置,即扇面中心线的平面上。风冷式(AF)变压器周围的温度传感器应放置在能读出进入冷却装置的空气的真实温度的位置。试品的周围要消除热空气的再循环,保证稳定的环境条件。

2.1.2 冷却水温度

试验期间尽量减小冷却水温度的变化,保持水温的恒定,应在水冷却器冷却水进口处水管中心位置定时(0.5h)测定水的温度,同时记录水的流量,或采用自动记录仪记录冷却水的温度和流量。

2.2 油温度的测定

2.2.1 顶层油温度

顶层油温度是用一个或多个插入油箱顶部,或插入油箱与散热器(或冷却器)的联管内的压力式温度计进行测量。对于大型变压器,油箱顶部不同位置可能具有不同的温度值,这与变压器的结构(如冷却装置进出口位置、有载调压变压器器身中心不在油箱中心等)有关。在箱盖上压力式温度计的传感器在测温时,可能受到箱盖上涡流的干扰。在强迫油循环变压器中,进入冷却器的油是绕组中油和绕组外部油的混合油,在油箱不同位置或各个油联管处的温度也可能不同。因此大型变压器要设置几个测点,取其平均值。

2.2.2 底部油温度

“底部油”是指从绕组底部进入绕组的冷却油,底部油温度是指从冷却装置回到油箱内的油的温度。其值为冷却装置下部与油箱的联管内的多个温度计读数的平均值。如果冷却装置与变压器联接的进出口管路中未设计有测温的温度计座,则必须加装带有测温用温度计座的工艺联管,决不能将传感器贴在联管壁上进行测温。如果这样测温会产生较大的负偏差,原因是强迫油循环的回油管路中的油流可能出现湍流,自然循环的散热器中可能出现层流,且管路内外管壁间存在一定的温度差。

2.2.3 油平均温度

油的平均温度原则上应是绕组内部冷却油的平均温度,且各绕组是不相同的(因各绕组的热负荷是不同的)。作为试验估算目的,一般取顶层油温度和底部油温度的平均值作为油的平均温度。

对于容量为2 500kVA及以下、具有平滑油箱或散热装置直接焊在油箱上的自冷式(ONAN)变压器,其高于环境温度的油平均温升值可取顶层油温升的80%。

2.3 绕组温度的测定及温升计算

2.3.1 绕组平均温度和平均温升的确定

绕组平均温度是通过绕组电阻确定的(称之为电阻法)。对于三相变压器,最好在中柱(通常称之为B相)进行测量。但对于中性点引线电阻占绕组电阻较大百分比的配电变压器,不宜测相电阻,应测线电阻。

温度 θ_2 下的电阻 R_2 与 θ_1 下的电阻 R_1 之间的比值与温度之间的比值关系为:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} \text{ (铜导线)}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1} \text{ (铝导线)}$$

变压器绕组电阻测量时,要求稳定条件下进行绕组冷态电阻测量(R_1, θ_1),在另一温度 θ_2 下测出电阻 R_2 (最终热电阻)。这样就可求得温度 θ_2 值:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (235 + \theta_1) - 235 \text{ (铜导线)}$$

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (225 + \theta_1) - 225 \text{ (铝导线)}$$

温升试验结束,切断电源时,如果外部冷却介质的温度为 θ_a ,则绕组平均温升为:

$$\Delta\theta_w = \theta_2 - \theta_a$$

这里要注意,测得的绕组热态电阻 R_2 是在切断电源、断开短路线之后测定的,切断电源瞬间绕组热态电阻 R_2 要进行外推法校正。

2.3.2 电源切断后绕组电阻测定

切断电源、打开短路线,把待测量的绕组接入直流测量电路。由于绕组电气时间常数大,必须采用快速测量技术,要保证在切断电源后3min~4min的时间内准确测得3~4点热电阻值,然后每隔30s测取一点,总点数不得少于15点。

为了保证数据的准确性,测量热电阻的电路、仪器设备必须与测冷态电阻时相同,且由同组人员操作。

2.3.3 确定电源切断瞬间绕组电阻的外推法

利用切断电源时起大约20min内测取的相当点数的离散值,作为外推电源切断瞬间温升的数据。用这些离散值从时间上外推到电源切断瞬间,从而获得电源切断瞬间的值。

由测得的离散值构成的曲线见图15-2(a)所示,曲线呈现出绕组温度在开始几分钟内变化最快,然后逐渐缓慢。

对于热时间常数大的变压器(容量较小油浸自冷式),油温变化渐近线可以认为是一条水平线,见图15-2(b)。

对于热时间常数较小的变压器(特别是对强迫冷却的大型变压器,试验电源切断后要求冷却装置保持继续运行的情况下),其油温渐近线,可能有必要认为是向下倾斜的曲线,在该渐近线迭加有初始变化较快的部分,见图15-2(c)、15-2(d)。

应用计算机程序进行估算:

绕组电阻 $R(t)$ 在热状态下随时间的变化可以看成由二项函数组成,一项函数为固定不变的或线性衰减或指数衰减的函数,即油的平均温度;另一项函数是按变压器绕组的热时间常数 T 呈指数衰减的绕组平均温度与油平均温度之差 B ,即铜油温度差。

绕组电阻 $R(t)$ 与时间 t 关系如下:

$$R(t) = A(t) + B \cdot e^{-t/T} \quad (15-2)$$

当测量时间 t 足够长时, $B \cdot e^{-t/T}$ 趋向于零,此时 $R(t)$ 为:

$$R(t) = A(t) \quad (15-3)$$

$$A(t) = A_0; \text{或} A(t) = A_0(1 - Kt); \text{或} A(t) = A_0 e^{-t/T_0}。$$

式中, T_0 为油温升按指数变化的时间常数,即变压器的热时间常数。

(1) 直线回归方程(图15-3):

在 $A(t) = A_0(1 - Kt)$ 中

令 $a = A_0$,

$b = -K \cdot A_0, x = t$,

$y = A(t)$,

则 $y = a + bx$

式中 a ——单权项;

b ——回归系数。

设 y, x 是已知数,而 a, b 是未知数,求 a, b 叫回归。

用最小二乘法求 a, b

设有一组数据 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$,并按直线相关,则有估算值 $\hat{y}_i = a + bx_i$

y_i 与 \hat{y}_i 的离差

$$y_i - \hat{y}_i = y_i - (a + bx_i)$$

离差平方和

$$E = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)]^2$$

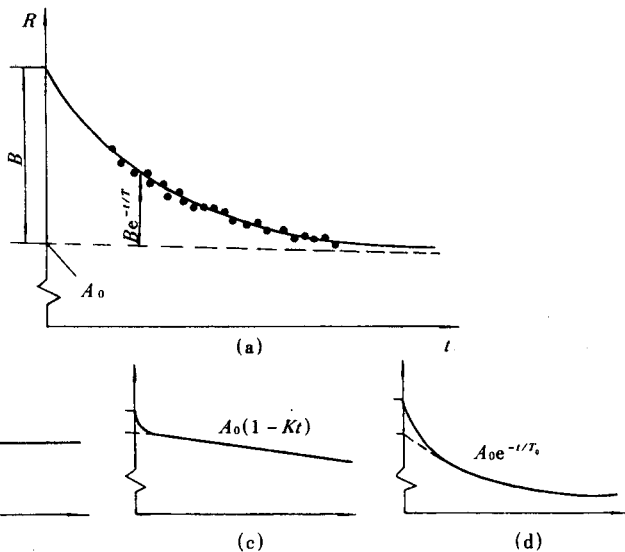


图15-2 电源切断后绕组电阻变化的估算

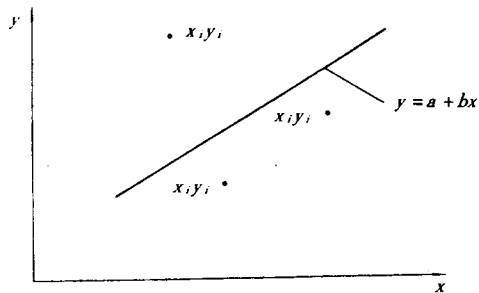


图15-3 离散值的直线

式中, y_i, x_i 是已知数, a, b 是未知数。

令离差平方和为最小, 则有:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)] = 0 \quad (15-4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)] x_i = 0 \quad (15-5)$$

由式(15-4)得:

$$\sum y_i - na - b \sum x_i = 0$$

$$\text{所以 } a = \frac{1}{n} (\sum y_i - b \sum x_i) = \bar{y} - b\bar{x} \quad (15-6)$$

式中 \bar{y}, \bar{x} 是平均值。

将式(15-6)代入式(15-5)得:

$$b = \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{n} \sum x_i \sum y_i}{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{L_{xy}}{L_{xx}} \quad (15-7)$$

式中 L_{xy} —— x, y 离差乘积之和;

L_{xx} —— x 离差平方和。

根据 a, b 可求出 A_0 和 K 。

(b) 曲线回归方程

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-t/T_0}, \text{ 其中 } t \text{ 是已知数, 两边取对数, } \ln A(t) = \ln A_0 - \frac{t}{T_0}$$

$$\text{令 } \ln A(t) = y, \ln A_0 = a, -\frac{1}{T_0} = b, t = x$$

得方程 $y = a + bx$

这样, 用最小二乘法可求得 a, b , 再求出 A_0, T_0 值。

当测量时间 t 较短, $A(t)$ 用 $A_0 \exp(-t/T_0)$ 表示时, $R(t)$ 为:

$$R(t) = A_0 \exp(-t/T_0) + B \exp(-t/T) \quad (15-8)$$

校正油温衰减的影响后为:

$$R(t) \exp(t/T_0) = A_0 + B \exp(t/T_0 - t/T) \quad (15-9)$$

对于式(15-9)所描述的断电后热电阻曲线, 可利用测量时间较短的一组 $[R(t_i), t_i]$ 值及最小二乘法的非线性回归程序进行拟合确定 A_0, B, T_0, T 的数值。具体步骤如下:

设 T_0 为某个初始值, 步长为 dT , 则分别在 $T_{01} = T_0 + dT_0, T_{02} = T_0 + 2dT_0, T_{03} = T_0 + 3dT_0$, 对式(15-9)进行拟合, 并算出每次的剩余平方和 S_1, S_2, S_3 。

$$S = \sum \{R(t_i) \exp(t_i/T_0) - A_0 - B \exp[t_i \times (1/T_0 - 1/T)]\}^2$$

比较 S_1, S_2, S_3 使 T_0 沿着 S 变小的方向增大或减小, 直到某个 T_0 时的 S 大于 $T_0 \pm dT_0$ 时的 S 值为止。以此时的 T_0 为新的初值, 并设新的步长 $dT_0 = dT_0/2$, 再重复上述步骤, 直到满足给定精度 $\epsilon > (S_n - S_{n-1})/S_n$ 为止, 此时的 T_0, T, A_0, B 即为最终结果。

利用上述原则和方法, 国家变压器质量监督检验中心组织编制了计算机软件。利用该软件即可

方便快速地求出产品的热电阻方程和曲线,一台S9-4 000/35电力变压器在短时间内测量的一组热电阻值和时间见表15-2,利用上述软件计算并打印出的热电阻方程式和热电阻曲线见图15-4。

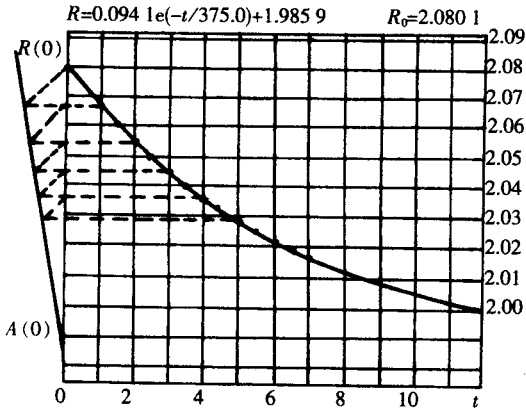
(2)传统的图解外推法:

用测得的相当数量的离散值拟合出一条平滑的曲线,从电源切断瞬间起,按相等时间间隔与曲线相交,电阻按指数衰减,各坐标点的电阻差值构成几何级数,按图15-5的图解过程拟合出一条倾斜的直线与纵轴相交,交点即相应于 A_0 值。在直线的另一端用作图方式求得 R_2 值,即切断电源瞬间的绕组的热电阻值 $R(0)$ 。

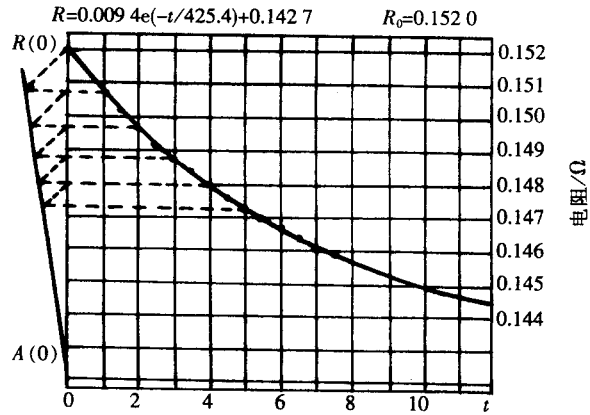
当 $A=A_0$,即当变压器的热时间常数较大(容量较小的油浸自冷式),油的变化渐近线是一条水平线时,原标准使用对数线性坐标外推法。

2.3.4 温升试验中带电测量绕组热电阻的方法(带电测温)

国家标准GB1094.2—1996第5.2.2条(6)施加额定电流(第二个试验阶段)一节中规定,在不切断电源的情况下,采用叠加法(在绕组负载电流上叠加一低值直流电流的方法)测定绕组直流电阻。



(a)高压绕组曲线



(b)低压绕组曲线

图 15-4 热电阻曲线

表 15-2 S9-4 000/35 电力变压器温升热电阻

时间	高压绕组热电阻/ Ω	低压绕组热电阻/ $m\Omega$
1'30"	2.061	0.150 2
2'	2.055	0.149 7
2'30"	2.049	0.149 2
3'	2.044	0.148 8
3'30"	2.039	0.148 4
4'	2.035	0.147 9
4'30"	2.032	0.147 6
5'	2.028	0.147 3
5'30"	2.025	0.147 0
6'	2.022	0.146 7
6'30"	2.019	0.146 4
7'	2.017	0.146 1
7'30"	2.014	0.145 9

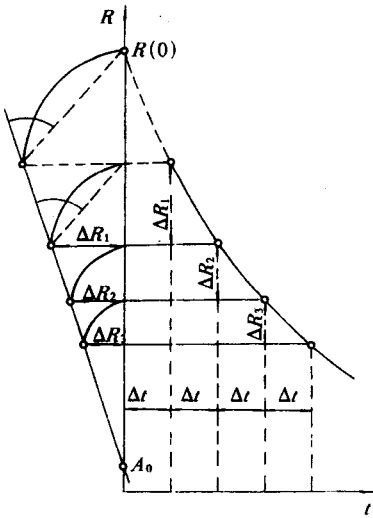


图15-5 用作图法外推到电源切断时的电阻值

现将此法介绍如下：

采用短路接线施加负载，当被试变压器的绕组带有引出的中性点时才能采用此方法。

在交流电流上通过电源中间变压器下的中性点，叠加一直流电流到被试绕组中，通过另一台辅助变压器 T_2 的中性点，测定叠加的直流电流在该绕组上的电压降，从而求得电阻值。因此，在整个试验期间可连续监视绕组温度变化情况。由于直流叠加在星形联结的三相绕组之中，而且测得的直流电压降是三相绕组的并联值，因此计算出的绕组平均温升是三相绕组的平均温升。

试验接线见图15-6。

从图15-6看到，双臂电桥桥臂 R_1 中串联了滤波器电感线圈和辅助变压器 T_2 三相绕组的并联电阻。为了保证电桥平衡时其桥臂间的正常关系(保证测量精度)， R_2 必须与 R_1 及 R_1 臂中串入的上述两附加电阻之和相等。这样，当电桥平衡时，双臂电桥平衡的方程式为：

$$R_x = R_N \frac{R_2}{R}$$

式中 R_x ——被试变压器三相绕组并联电阻， Ω ；

R_N ——标准电阻， Ω ；

R_2 ——电桥桥臂电阻(选定为某一定值)， Ω ；

R ——电桥桥臂电阻(调平衡的臂)， Ω 。

桥臂 R_1 中辅助变压器的绕组电阻由于试验过程中绕组温度的变化，绕组电阻也会有所升高，因此 R_1 本身的电阻应取较高的值，以减小因此而引起的测量误差。

在测量过程中，电源三相电压的不对称和线路中变压器阻抗的不对称，会在三台变压器中性点之间出现零序电压(T_x 与 T_2 中性点之间)，影响电桥指零仪的平衡。遇到这种情况，应设法调整滤波器参数，把交流成分滤掉，使之不进入电桥平衡电路。

3 局部过热的判断

温升试验中，即使存在局部过热，油和绕组也不会显示出异常的温升值。对于油箱内部的局部过热，采用油中溶解气体的色谱分析，可以有效地探测到。对油箱表面(含升高座等)的过热，可以用红外扫描热像图来探测。随着变压器的容量增大，漏磁通的影响是个潜在的危险，结构处理不当，在漏磁通回路中就会出现局部过热，各个厂家都有过这样的情况。

对温升试验开始前、试验过程中、试验终了时和结束后一定时间(2h)内抽取的油样分析结果进行比照，各种烃类气体的体积分数不应有明显的变化。分析与判断方法详见国家标准GB 7252—1987《变压器油中溶解气体分析和判断导则》和专业标准JB/T 8637—1997《油浸式电力变压器带有油中溶解气体分析的温升试验导则》。

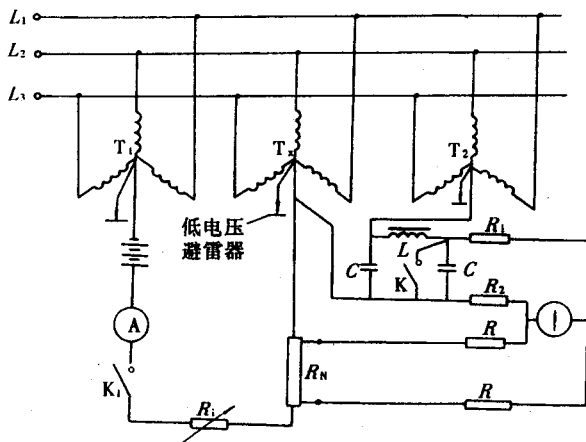


图15-6 带电测量变压器绕组温度的试验接线

T_1 —电源升压变压器 T_2 —测量用辅助变压器

T_x —被试变压器 L 、 C —滤波器的电感和电容

R_N —标准电阻 R_1 、 R_2 、 R —双臂电桥的桥臂

R_1 —调直流电流用变阻器

4 电源容量的估算和无功补偿

变压器温升试验所需视在功率等于变压器的额定容量 S_n 乘以短路阻抗的百分数再乘以总损耗与75℃的负载损耗之比。例如1台容量为31 500kVA三绕组有载调压变压器最大短路阻抗为17%~18%，损耗比为1.2~1.25，则试验所需视在功率为6 400kVA~7 100kVA。为此，必须使用电容器来补偿无功功率，降低电源供电容量，以满足试验要求。

4.1 试验所需的电源容量(视在功率)的计算

以1台SFSZ-31 500/110型三相三绕组变压器为例：该变压器三绕组容量相同，为31 500kVA，额定电压为 $(110 \pm 8 \times 1.25\%) / 38.5 / 11$ ，采用短路法在最大电流分接上进行试验。该分接上各参数如下：

最小分接电压：99kV(110kV， $-8 \times 1.25\%$ 分接)；

最小分接电流：183.7A；

最小分接短路阻抗：17%；

最小分接负载损耗：195kW；

空载损耗：40kW；

最小分接总损耗：195+40=235(kW)。

用短路法在施加总损耗时，对110kV绕组的供电电压、电流及视在功率为：

$$\text{供电电压 } U = 99 \times 0.17 \times \sqrt{\frac{235}{195}} = 18.48 (\text{kV})$$

$$\text{供电电流 } I = 183.7 \times \sqrt{\frac{235}{195}} = 201.66 (\text{A})$$

$$\text{供电视在功率 } S = \sqrt{3} IU = \sqrt{3} \times 18.48 \times 201.66 = 6455 (\text{kVA})$$

4.2 补偿容量的计算

因试验负载性质是电感性负载，故可用电容器容性负载进行补偿。电容器在电路中有三种不同连接法：如果中间变压器容量足够大，电容器可接在低压电源端；如果中间变压器容量较小，则通常接在试品端，也就是中间变压器与试品之间，也可以在中间变压器两侧同时补偿。

上述实例中采用在试品端补偿。设中间变压器容量为1 600kVA，额定电压为22/3.3kV，电源发电机视在功率为1 500kVA，输出电压为3.3kV。补偿电容器每台容量为100kvar，额定电压为 $\frac{11}{\sqrt{3}}$ kV。

4.2.1 补偿电容器三相联结成星形(Y形)

因为试验所需电压为18.48kV，故相电压为10.67kV，每相需两台电容器串联，然后联结成Y形。图15-7为一组电容，在18.48kV电压下该组实际补偿容量为

$$\begin{aligned} S' &= 100 \times 6 \times \left[\frac{18.48}{\left(2 \times \frac{11}{\sqrt{3}} \right) \times \sqrt{3}} \right]^2 \\ &= 600 \times 0.7056 = 423.36 (\text{kvar}) \end{aligned}$$

在中间变压器输出电压为18.48kV时，如果不考虑中间变压器阻抗压降，则电源输出电压应为：

$$U_F = 3.3 \times \frac{18.48}{22} = 2.772 (\text{kV})$$

发电机输出容量为：

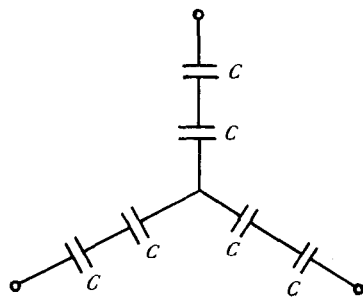


图15-7 电容器Y联结补偿

$$1\,500 \times \frac{18.48}{22} = 1\,260 (\text{kVA})$$

这样电容器组最少补偿容量为:

$$6\,455 - 1\,260 = 5\,195 (\text{kvar})$$

所需电容器数量

$$\frac{5\,195}{423.36} = 12.27 \text{ 组, 取 13 组, 共 78 台}$$

13组电容器的实际补偿总容量为:

$$423.36 \times 13 = 5\,503.68 (\text{kvar})$$

这样发电机输出容量为:

$$6\,455 - 5\,503.68 = 951.32 (\text{kvar})$$

4.2.2 补偿电容器三相联结成三角形

由上面计算可知, 电容器的实际使用电压只达到额定电压的 $0.84 (\frac{18.48}{22} = 0.84)$ 倍, 容量只达到 $0.705\,6 (0.84^2 = 0.705\,6)$ 倍, 如果用3台电容器串联再接成三角形(图15-8), 则其额定电压为 $(11/\sqrt{3}) \times 3 = 19.05 (\text{kV})$ 。这样每组补偿容量可达到

$$100 \times 9 \times (\frac{18.48}{19.05})^2 = 900 \times 0.941 = 846.9 (\text{kvar})$$

需要电容器总数为:

$$\frac{5\,195}{564.6} = 6.1 (\text{组}), \text{取 6 组, 共 } 6 \times 9 = 54 \text{ 台, 若}$$

取7组, 共 $7 \times 9 = 63$ 台

当取7组时, 补偿总容量为:

$$846.9 \times 7 = 5\,928 (\text{kvar})$$

发电机电源侧输出容量为:

$$6\,455 - 5\,928 = 527 (\text{kvar})$$

以上计算表明电容器采用Y或D不同联结时可以提高单台电容器的使用容量, 减少电容器总数。

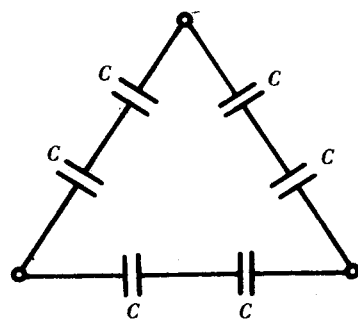


图15-8 电容器三角形联结补偿

第五节 干式变压器的温升试验方法

1 对试验环境的要求

(1) 被试品周围的冷却空气温度变化应尽量小, 不要放在空气流动大的车间或试验室的大门附近或通道旁。

(2) 要避免其他热源热辐射的影响, 如干燥炉等。

(3) 被试品周围一定距离内不要堆置影响散热的障碍物。

2 施加负载的方法

干式变压器与油浸式变压器不同, 干变运行中铁心和绕组产生的热靠冷却空气的对流和热辐射直接散到空气中的一次性散热, 故不能采用油浸变压器短路接线的等效试验方法。

国标GB6450—1986《干式电力变压器》第5.11条温升试验规定三种施加负载的方法:直接负载法、相互负载法(循环电流法)和模拟负载法。因绕组的热负荷比铁心高,热时间常数比铁心小,为了减少试验时间,前两种方法在对绕组施加负载电流之前,可先对铁心励磁进行不少于12h预热。

2.1 直接负载法

在被试品的一个绕组(最好是靠铁心的绕组)上施加额定频率的额定电压励磁,另一个绕组连接适当的负载,使两个绕组中流过额定电流。负载可以是电阻。电抗器或电力电容器损耗小且容易置备,可作为首选。试验接线原理见图15-9。图中未画出监测电压、电流的测量回路。

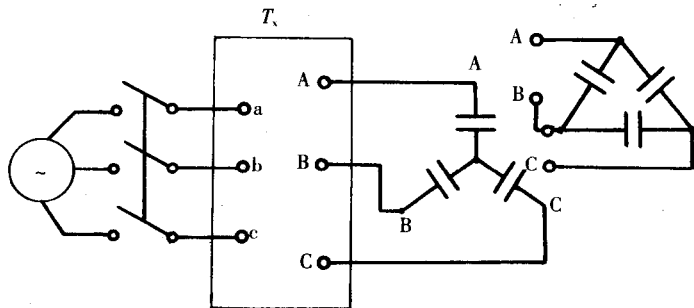


图 15-9 直接负载法试验接线原理图

例:一台250kVA额定电压 $10\pm5\%/0.4\text{kV}$ 的变压器,可选容量为100kvar额定电压为 $11/\sqrt{3}\text{kV}$ 或11kV的电力电容器连接成星形或三角形做负载(图15-9)。对低压绕组施加400V额定频率的额定电压,高压绕组主分接10kV,此时三台电容器产生的实际负载:

星形接法(Y)

$$100\text{kvar}\times\left(\frac{10/\sqrt{3}}{11/\sqrt{3}}\right)^2\times3=300\text{kvar}\times\left(\frac{10}{11}\right)^2=248\text{kvar}$$

三角形接法(D)

$$100\text{kvar}\times\left(\frac{10}{11}\right)^2\times3=300\text{kvar}\times\left(\frac{10}{11}\right)^2=248\text{kvar}$$

标准要求负载容量(电流)不得小于90%被试品额定容量(电流),故直接负载法只适用于小容量配电变压器。

2.2 相互负载法

此法为干式变压器温升试验的较好方法。

两台额定电压和联结组标号相同的变压器高、低压绕组并联连接,其中一台为被试品,另一台额定容量不小于被试品的变压器作辅助变压器。对不带分接的低压绕组施加额定频率的额定电压励磁,调节辅助变压器高压绕组的主分接位置,通过两台变压器的不同变压比使被试品绕组中流过额定电流,试验接线原理见图15-10,图中未画出电压、电流监测回路。

无励磁调压变压器调压范围为 $\pm5\%$ (或 $\pm2\times2.5\%$),容量630kVA及以下变压器的阻抗电压为4%,如果辅助变与被试变容量相同,两台的阻抗压降为8%,被试品应在主分接(Ⅱ),这时不论辅助变分接在Ⅰ或是Ⅲ,二变的变压比只差5%,无法产生额定电流(循环电流)。只有选择调压范围为 $\pm4\times2.5\%$ 的有载调压变压器作辅助变才能使两台变压器的变压比之差 $>8\%$,而使被试品绕组中流过额定电流(或接近于额定电流)。

另一办法是选用大容量的辅助变,减小辅助变的阻抗压降,当两台变压器的阻抗压降之和不大于5.5%,辅助变容量为被试变3倍时,就能产生 $>90\%$ 的被试品额定电流。

容量630kVA~2500kVA的无励磁调压变压器阻抗电压为6%,温升试验应在最小分接。选用调压范围为 $\pm4\times2.5\%$ 同容量的辅助变,两台变压器的变压比之差可达12.5%,而二变的阻抗压降为

12%,就能产生>90%的额定电流。

凡批量生产干式变压器同时生产油浸变压器的企业,产品品种规格较全,极易选得合适的辅助变压器。

相互负载法的另一种试验接线是在高压绕组并联回路内另外输入电压的方法,调节该电源使被试变压器绕组内流过额定电流,试验接线见图15-11,图中未画出电压、电流监测回路。此法要有两台辅助变和第二个可调压电源,占用设备多采用得少。

2.3 模拟负载法 (协议方法)

直接负载法和相互负载法中被试变压器以额定频率的额定电压励磁,铁心中产生额定损耗,绕组中流过额定电流,其工况与实际运行时工况相同,所得数据准确可靠。

GB6450—1986《干式电力变压器》第5.11.1.3模拟负载法规定,要根据制造厂与用户间的协议进行。

此法适用于封闭型或非封闭型的干式自冷变压器。当被试品仅有一台或者虽有类似产品但受试验设备限制时采用此法。

本方法分成二次试验,先在额定频率的额定电压下连续进行空载试验一直持续到稳定状态,然后停电立即测量各绕组(通常是中间相)的电阻,计算出绕组平均温升 $\Delta\theta_0$ 。接着进行负载试验,即将低压绕组短路对高压绕组施加额定电流。试验一直持续到稳定状态,然后停电测量各绕组电阻(与第一同名相),计算出绕组平均温升 $\Delta\theta_1$ 。

由先后两次测得的绕组平均温升 $\Delta\theta_0$ 和 $\Delta\theta_1$ 用下述公式(叠加法)计算出被试变压器在额定励

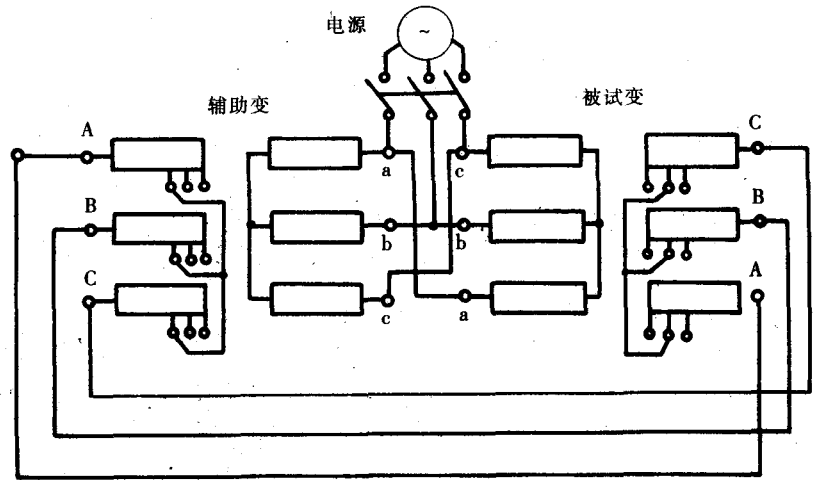


图 15-10 相互负载法试验接线原理图之一

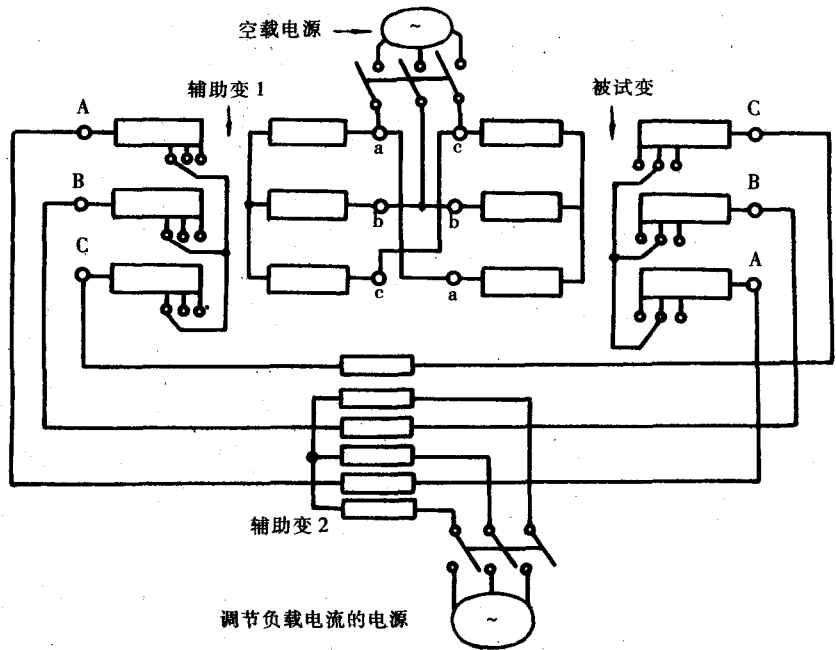


图 15-11 相互负载法试验接线原理图之二

磁,绕组中流过额定电流工况下的绕组平均温升 $\Delta\theta_c'$ 。

$$\Delta\theta_c' = \Delta\theta_c \left[1 + \left(\frac{\Delta\theta_c}{\Delta\theta_c} \right)^{1.25} \right]^{0.8} \quad (15-10)$$

标准规定上述公式仅适用于封闭型和非封闭型自冷式变压器。国标GB6450—1986是等效采用IEC726—82标准,标准明确说明模拟法温升试验要根据制造厂与用户间的协议进行,且当试品仅有一台或虽有类似产品但受试验设备限制时采用此法。这表明模拟法准确度较低。

对新产品鉴定,特别是仲裁性试验或温升接近限值的产品,应尽力创造条件采用相互负载法或直接负载法进行温升试验,容量不大的配变更应如此。

3 温度稳定条件的确定

为确定温升已达到稳定的条件,应将温度传感器放在下述表面:

封闭和非封闭型的变压器:应放在上铁轭的中心处和靠近最内部绕组端部铁心柱表面。对三相变压器应放在中间铁心柱表面。

密封和全封闭型的变压器:应放在上盖表面中外壳的高低压侧表面的中心处。

当温升的变化值每小时不大于温升限值的2%或不大于2K(取二者中较小值)时,即认为温升已经稳定。此时即可按照本章第四节2(3)项的方法测定绕组电阻,并计算绕组平均温升。

4 确定切断电源瞬间绕组热态电阻的外推法

GB6450—1986第5.11条规定采用GB1094.2—1985版第3.9.2条使用线性坐标外推法和第3.9.3条使用对数—线性坐标外推法。

4.1 使用线性坐标外推法

由测得的一系列热电阻值,在普通线性坐标纸上画出时间—电阻曲线,用作图法将该曲线外推到切断电源瞬间(即时间为零)时的热电阻 R_2 。其外推作图方法与油浸变压器温升试验方法中的外推作图法相同(本章第三节中2.3、(3)、②项)

4.2 使用对数—线性坐标的外推法

令线性坐标(横坐标)代表时间,对数坐标(纵坐标)代表切断电源后测得的与时间对应的各点电阻 R 与正在冷却的绕组某参考点(通常取约20min的最后一点)电阻 R_n 的差值 ΔR ,绕组温度随时间冷却成指数衰减,离散的 ΔR 点拟合成一平滑的直线,见图15-12,直线向左上方延伸与纵坐标的交点即为切断电源瞬间时间为零时的热电阻 R_2 与参考点热电阻 R_n 的差值 ΔR 。得 $R_2 = R_n + \Delta R_0$,由 R_2 求得切断电源瞬间绕组的平均温度,减去周围冷却空气的温度,即是绕组的平均温升。

5 降低试验电流时绕组平均温升的校正

GB6450—1986规定,当试验输入电流 I_t 低于额定电流 I_n ,但不小于90% I_n 时,绕组温度达到稳定后,以电阻法测得的绕组平均温升 $\Delta\theta$,应按下式校正到额定负载条件:

$$\Delta\theta_n = \Delta\theta \left[\frac{I_n}{I_t} \right]^q$$

q 值:自冷式(AN)变压器为1.6;风冷式(AF)变压器为1.8。

国标GB1094—1996《电力变压器 第2部分 温升》第5.6条规定施加电流与规定的电流之差在 $\pm 10\%$ 之内,可用公式进行校正。既规定了下限也规定了上限。

6 关于干式变压器采用油浸式变压器“使用线性坐标外推法”和“采用对数线性坐标外推法”确定切断电源瞬间绕组电阻,求得绕组平均温升的不确定性的看法

6.1 国标GB1094.2—1996对GB1094.2—1985的修改

国标GB1094.2—1996将GB1094.2—1985第3.9.2和3.9.3条修改为第5.5条和附录C3,把切断电源

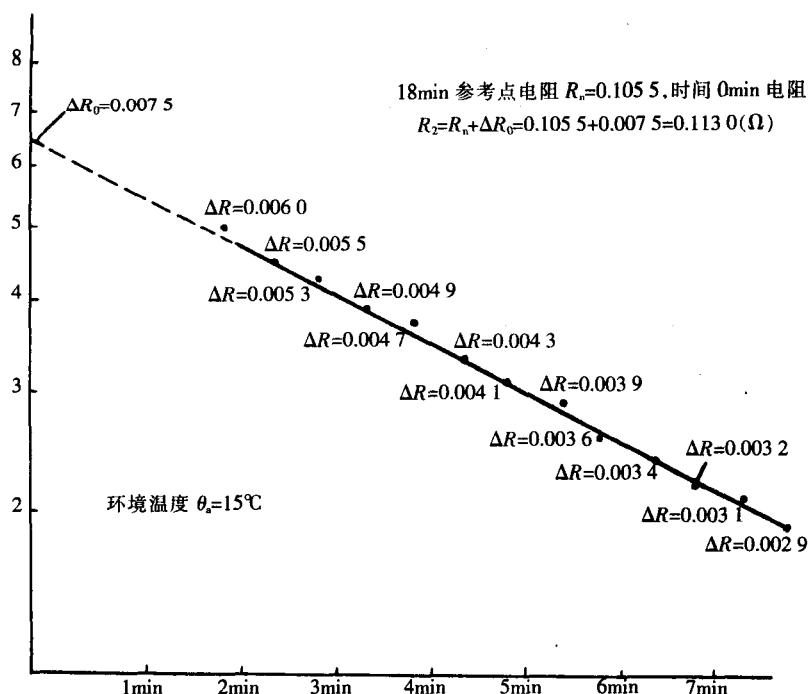


图 15-12 使用对数—线性坐标,用图解外推到切断电源瞬间绕组电阻值 R_2

后测得的热电阻 R 值随时间衰减的 $R-t$ 曲线看成由两项组成,其中一项表示绕组周围冷却介质(油)的平均温度不随时间变化,或随时间线性衰减或呈指数衰减的函数。另一项表示绕组电阻随时间呈指数衰减的函数。详见 GB1094.2—1996 附录 C3。

油浸自冷式小容量变压器时间常数大于 3h,切断电源后绕组周围油平均温度在约 20min 内可看作不变或有微小降低而忽略不计,这时第一项为一水平直线,用传统的图解外推法推定切断电源瞬间绕组热电阻具有较小的不确定度。风冷和强油风冷的变压器结构紧凑,油量少,热时间常数小于 3h,这时第一项为随时间向下倾斜的直线或呈指数衰减的曲线,绕组热电阻随时间变化的曲线由变化的第一项和第二项合成,切断电源瞬间的绕组热电阻应采用 GB1094.2—1996 附录 C3 通过数学回归法来确定,采用图解外推法会有较大的不确定度。

油浸电力变压器作了修改,GB6450—1986《干式电力变压器》是引用 GB1094.2—1985 版,而 1985 版已被 1996 版代替,GB6450—1986 将如何修改是试验人员关注的。

6.2 干式变压器不同的绕组结构和不同的冷却方式的影响

6.2.1 不同的绕组结构

干式变压器绕组有用固体绝缘包封(浇注式)和不包封两大类,前者冷却气体不直接与绕组接触,运行中绕组产生的热要先通过包封的固体绝缘再散发到冷却气体中。而非包封的绕组产生的热直接散发到冷却气体中得到散热。

6.2.2 不同的冷却方式

干式变压器有无保护外壳的非封闭型和有保护外壳能使外界空气以循环方式直接冷却铁心和绕组的封闭型,还有有保护外壳能使外界空气不以循环方式冷却铁心和绕组的全封闭型和壳内气体不能与外界空气发生交换的密封型。

由上述的种种不相同,切断电源后绕组电阻随时间衰减的变化曲线是会有差别的,用同一种图

解外推法,会产生不同的不确定度。

总之从GB1094.2—1996标准来看,不同结构的干式变压器如何更准确地推定切断电源瞬间绕组热电阻值还应进一步的研究和试验。并关注国际电工委员会IEC标准关于此项内容是否修改及修改情况。

第六节 特殊变压器的温升试验方法

1 分接范围超过 $\pm 5\%$ 的双绕组变压器

除非有特殊规定,温升试验应在“最大电流分接”上进行,在试验第二阶段应施加试验分接上的额定电流。

试验第一阶段中施加的总损耗应等于具有最大总损耗分接上的总损耗,在恒磁通调压具有独立绕组的变压器中,最大电流分接一般都是最大总损耗分接。在带有分接的自耦变压器中最大总损耗分接不一定是最大电流分接,要根据分接的布置来选择试验分接。

在计算最大电流分接绕组的平均温升时,若最大电流分接不是最大总损耗分接,所用的油平均温升值应与该分接(最大电流分接)上的总损耗相对应,可以应用施加最大总损耗的试验第一阶段所获得的数据进行校正。

温升试验时分接范围的选择见GB1094.1—1996标准。

2 多绕组变压器

2.1 一个绕组的容量等于其他绕组容量之和的变压器

进行温升试验时要求所有的绕组带各自的额定容量(或分接容量),若有规定的多种负载组合,测定油温升应在产生最大总损耗的情况下进行。

此种容量组合的变压器各副绕组的容量分配及与主绕组间的短路阻抗的大小比例通常是不相匹配的,因此采取将各副绕组同时短路的方法进行温升试验,各绕组中的电流很难同时达到各自的额定电流。可以选用下述任一方式施加总损耗:

(1)对全容量绕组供给与总损耗相对应的电流在绕组中所产生的总损耗。在其余绕组上同时接适当的阻抗作负载(电抗器或电容器)。这相当于直接负载法。

(2)如果有的绕组容量较低,就将其开路。在其他绕组短路的情况下,对全容量绕组供给与总损耗相对应的电流所产生的总损耗,此时短路绕组中的电流会高于额定值,需考虑其过载能力,不能让其出现过热。

各绕组对油的温差,即铜油温差是在各绕组分别流过额定电流时取得的。

2.2 多绕组满负载联合运行的变压器

为了在电力系统中提高电网的功率因数,在变压器的第三绕组上接补偿电容器作为负载(以联变居多),这样就形成多绕组满负载联合运行方式,三个绕组中同时产生满负载负载损耗,总损耗达到最大,油温升至最高。

多绕组变压器的负载损耗是在绕组之间测得的,例如三绕组变压器绕组1与绕组2间、绕组1与绕组3间和绕组2与绕组3间。而多个绕组同时通以额定电流(或相的额定电流的某一百分数值)时的负载损耗是无法测量的。但可以从成对绕组的负载损耗中求解各绕组自身的负载损耗,然后相加得出多绕组满容量运行时的总负载损耗。例如有一台三绕组自耦变压器,其第三绕组自身容量 S 为变压器额定容量 S_n 的 $1/3$,实测负载损耗分别为:

高压绕组对中压绕组: P_{H-M} (变压器额定容量 S_n 时);

高压绕组对低压绕组: P_{H-L} (低压绕组容量 S 时);

中压绕组对低压绕组: P_{M-L} (低压绕组容量 S 时)。

为了求各绕组在自身容量时的负载损耗,必须把三组实测负载损耗折算到同一基准容量——变压器的额定容量 S_n ,然后求解。

$$\text{高压绕组的负载损耗 } P_H = P_{H-M} + P_{H-L} \times \left(\frac{S_n}{S}\right)^2 - P_{M-L} \times \left(\frac{S_n}{S}\right)^2$$

$$\text{中压绕组的负载损耗 } P_M = P_{H-M} + P_{M-L} \times \left(\frac{S_n}{S}\right)^2 - P_{H-L} \times \left(\frac{S_n}{S}\right)^2$$

$$\text{低压绕组的负载损耗 } P_L = P_{H-L} \times \left(\frac{S_n}{S}\right)^2 + P_{M-L} \times \left(\frac{S_n}{S}\right)^2 - P_{H-M}$$

$$\text{低压绕组在自身容量为 } S \text{ 时的负载损耗 } P_L = P_L' \times \left(\frac{S}{S_n}\right)^2$$

由此求得三个绕组各自满容量下的总负载损耗,也就是第一试验阶段应施加的总损耗 P

$$P = P_H + P_M + P_L$$

2.3 具有同心式绕组排列的、有两个或多个独立绕组上下排列且容量及尺寸都相同的变压器
对于这种结构变压器,最常见的是发电厂自用的轴向分裂厂用变,其绕组排列见图15-13。

这种变压器的每组低压绕组容量通常是变压器额定容量的60%~65%(如31 500/20 000~20 000kVA, 40 000/25 000~25 000kVA)。总损耗是全穿越运行时的空载损耗与负载损耗之和。由于半穿越运行时总损耗小于全穿越负载损耗,实际上全穿越运行时,变压器的油和绕组的平均温升均高于半穿越运行的变压器。

对于这种结构的变压器的低压绕组的平均温升,国标GB1094.1—1996规定取两个绕组平均温升的平均值。例如分别测取低压绕组1和低压绕组2的绕组平均温升,再取二者的平均值作为低压绕组的平均温升值。

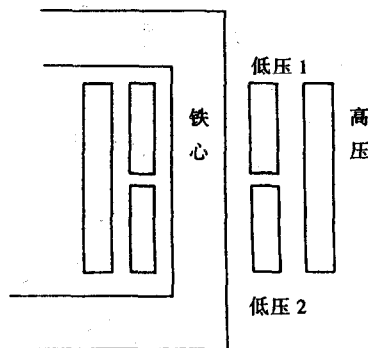


图15-13 轴向双分裂变压器绕组排列示意图

第十六章 零序阻抗测量

第一节 概 述

什么是零序阻抗？在GB1094.1—1996电力变压器总则标准3.7.3中定义如下：额定频率下，三相星形或曲折形联接绕组中，连接在一起的线路端子与其中性点端子之间的以每相欧姆数表示的阻抗。

零序阻抗还取决于其他绕组的连接方法和负载，因而零序阻抗可以有几个值。而D接绕组就不存在零序阻抗。标准将零序阻抗试验定为特殊试验。

零序阻抗试验比较简单：将ABC连在一起，对ABC与O点施加交流电压，即额定电压，测空载零序阻抗或加到额定电流，测短路零序阻抗，即可计算出零序阻抗欧姆数/相。

为了计算不平衡状态下的各处电压、电流，引出了正序、负序和零序阻抗。测量出的变压器零序阻抗数据，可以计算与整定继电保护，保证系统及变压器的安全运行。

正、负、零相序其幅值可变，可以合成任一电压、电流三相矢量。反过来，任一三相电压、电流亦可分解为其固有的正、负、零相序分量。

从原则上讲，任何一台变压器，只要是星接，就可从ABC-O施加电压，测出零序阻抗，而不论其二次侧为星接或D联结。从系统要求看，零序阻抗是用于整定系统继电保护，因此一般只用于电力变压器，而不用于配电变压器。

第二节 零序阻抗的测量方法

1 有平衡安匝的零序阻抗测量

对于联接组标号为YNyn0d11, YNd11yn0和Dyn11yn11的三绕组变压器和YNd11的两绕组变压器，其中有一个是封闭的三角形连接的绕组，此类绕组均属有安匝平衡的绕组，这类试品的零序阻抗是线性的，其值与试验电流的大小无关，一般只测一点就可以了。考虑到中性点引线的负载能力，施加的电流值应不超过额定电流值，试验时通电时间尽可能短一些。试验线路图见图16-1。

如果是双绕组，则试验电压加在Y接绕组上，如果是三绕组，则试验依次在有零序回路的绕组上进行，其他绕组开路。由于有封闭的三角形连接的绕组存在，与试验绕组保持安匝平衡，其平衡电流沿着三角形接线自行构成短路回路。这种情况测得的零序阻抗都是“短路零序阻抗”。试验时以施加的电流为准，记录电压、电流与功率。功率用以计算零序阻抗的有功部分和无功部分。一般情况下，只提供零序阻抗，其计算如下：

$$Z_0 = U/I/3, \Omega/\text{相}$$

式中 Z_0 ——以每相欧姆数表示的零序阻抗；

I ——试验电流，A；

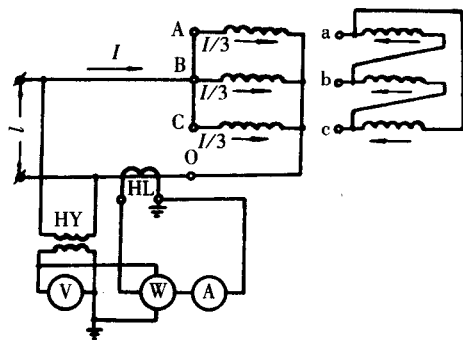


图16-1 零序阻抗试验线路图

HY—电压互感器 HL—电流互感器

V—电压表 W—功率表 A—电流表

U ——试验电压, V。

对于YNd11的产品只测量其高压绕组的零序阻抗。对YNyn0d11的产品需按表16-1的类型测量四次。

2 无平衡安匝的零序阻抗测量

绕组中没有封闭的三角形连接的产品的零序阻抗试验属于无平衡安匝的零序阻抗试验的范畴。下面通过对Yyn0和YNyn0yn0两种联结组标号的产品零序阻抗试验的介绍,说明这种类型零序阻抗的测试方法和原理。

2.1 Yyn0联结组标号产品零序阻抗测量

这种接线的产品,只有低压绕组有零序回路,所测的零序阻抗是空载零序阻抗,该产品没有短路零序阻抗。这种产品的零序阻抗值是非线性的,随着施加电流的增大而减少。因此,需要测量一系列阻抗值,一般不少于5点,如测量20%、40%、60%、80%和100%试验电流时的零序阻抗数值。试验电流一般要等于额定电流,如果零序阻抗太大,还要控制试验电流,使试验电压不超过额定相电压。

2.2 YNyn0yn0联结组标号产品零序阻抗测量

这种接线的产品,三个绕组均有零序回路,它不但有空载零序阻抗,而且有短路零序阻抗。空载零序阻抗需测量5点,每种短路零序阻抗需测量一点,其方法均与上述介绍相同。具体测试见表16-2。

在进行空载零序阻抗测量时,要注意观察试品油箱壁,避免零序磁通集中,引起箱壁局部过热甚至发红。

对于其他联结组标号的产品,可以参照上述联结标号的方法和原理进行试验。

做零序阻抗试验时只提供试验结果,不做合格与否判断。试验人员要自己计算零序阻抗值,并与试验值比较,判定其可信性。因此,试验人员要了解零序阻抗的物理概念。

3 IEC标准

IEC/TC14委员会于1992年10月提出了“电力变压器零序阻抗表”,见表16-3。

IEC/TC14说明如下:

表16-3适用于一般三相变压器同心式绕组。

表中(1)、(2)、(3)为励磁绕组代号,(1)为外绕组,其标志按惯例,哪一个为高压绕组,关系不大。

标志“YN”表示中性点直接或经低阻抗接地,“Y”表示中性点非直接接地。

给出的百分数为参考阻抗 U^2/S 。

某些连接用“*”作标志,此时励磁绕组零序电流与其他绕组电流不平衡,于是零序阻抗为磁化

表16-1 有平衡安匝的零序阻抗测量类型

类型	供电端子	开路端子	短路端子
1	ABC—O	Am, Bm, Cm, Om	—
2	ABC—O	—	AmBmCmOm
3	AmBmCm—Om	A, B, C, O	—
4	AmBmCm—Om	—	ABCO

表16-2 无平衡安匝的零序阻抗测量类型

类型	供电端子	开路端子	短路端子
1	ABC—O	Am, Bm, Cm, Om a, b, c, o	—
2	ABC—O	a, b, c, o	AmBmCmOm
3	ABC—O	—	AmBmCmOm abco
4	AmBmCm—Om	A, B, C, O a, b, c, o	—
5	AmBmCm—Om	a, b, c, o	ABCO
6	AmBmCm—Om	—	A, B, C, O a, b, c, o
7	abc—o	A, B, C, O Am, Bm, Cm, Om	—
8	abc—O	A, B, C, O	AmBmCmOm
9	abc—O	—	AmBmCmOm ABCO

表16-3 零序阻抗典型值

序号	绕组联结标志			三心柱阻抗/%			五心柱阻抗/%		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
1	YN*	Y		≈ 50	—		$\approx 10^4$	—	
2	Y	YN*		—	≈ 60		—	$\approx 10^4$	
3	YN	YN		$\alpha_1 Z_{12}$	$\alpha_2 Z_{12}$		Z_{12}	Z_{12}	
4	YN	D		$\alpha_1 Z_{12}$	—		Z_{12}	—	
5	D	YN		—	$\alpha_2 Z_{12}$		—	Z_{12}	
6	YN*	Y	Y	≈ 50	—	—	$\approx 10^4$	—	—
7	Y	YN*	Y	—	≈ 60	—	—	$\approx 10^4$	—
8	Y	Y	YN	—	—	≈ 70	—	—	$\approx 10^4$
9	YN	YN	Y	$\alpha_1 Z_{12}$	$\alpha_2 Z_{12}$	—	Z_{12}	Z_{12}	—
10	YN	Y	YN	$\alpha_1 Z_{12}$	—	$\alpha_3 Z_{13}$	Z_{13}	—	Z_{13}
11	Y	YN	YN	—	$\alpha_2 Z_{23}$	—	—	Z_{23}	Z_{23}
12	YN	YN	D	$\alpha_1 (Z_1 + Z_2 // Z_3)$	$\alpha_2 (Z_2 + Z_1 // Z_3)$	—	$Z_1 + Z_2 // Z_3$	$Z_2 + Z_1 // Z_3$	—
13	YN	D	D	$\alpha_1 (Z_1 + Z_2 // Z_3)$	—	—	$Z_1 + Z_2 // Z_3$	—	—
14	YN	Y	D	$\alpha_1 Z_{13}$	—	—	Z_{13}	—	—
15	D	YN	YN	—	$\alpha_2 (Z_2 + Z_1 // Z_3)$	$\alpha_3 (Z_3 + Z_1 // Z_2)$	—	$Z_3 + Z_1 // Z_2$	$Z_3 + Z_1 // Z_2$
16	D	YN	Y	—	$\alpha_2 Z_{12}$	—	—	Z_{12}	—
17	D	Y	YN	—	—	$\alpha_3 Z_{13}$	—	—	Z_{13}
18	D	YN	D	—	$\alpha_2 (Z_2 + Z_1 // Z_3)$	—	—	$Z_2 + Z_1 // Z_3$	—

注: Z_{12} 、 Z_{13} 和 Z_{23} 为正序短路阻抗; $Z_1 = \frac{Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}}{2}$, Z_2 和 Z_3 同样可以求出; $Z_1 // Z_2 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$, $Z_2 // Z_3$ 和 $Z_2 // Z_3$ 同样可以求出; α_1 、 α_2 和 α_3

为系数,在下述范围内,即 $0.8 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < 1$ 。

阻抗,取决于磁路,其值很高。

其他情况绕组电流平衡,零序阻抗相等或很接近,包括绕组原方短路阻抗在内。

对三绕组变压器,即表16-3中序号12、13、15、18,在测得 Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{23} 的百分数后,可算出 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 的百分数,再按表16-3计算 $Z_0 = \alpha(Z_1 + Z_2 // Z_3)$ 或 $Z_1 + Z_2 // Z_3$ 的百分数,如需用 Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{23} 直接表示,则对:

绕组1

$$Z_0 = Z_{13} - \frac{1}{4Z_{23}} (Z_{13} + Z_{23} - Z_{12})^2 \quad (16-1)$$

绕组2

$$Z_0' = Z_{23} - \frac{1}{4Z_{13}} (Z_{23} + Z_{13} - Z_{12})^2 \quad (16-2)$$

在 Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{23} 归化为HV与MV之欧姆数后,则 Z_0 与 Z_0' 分别为HV与MV零序阻抗欧姆数。

第三节 零序阻抗的计算方法

1 并联(空载)零序阻抗

当三相变压器二次侧开路时,只有一次侧励磁电流,此时的阻抗,称为励磁阻抗即并联正(或

负)序励磁阻抗。

当变压器一次绕组为YN结,二次绕组不能流通零序电流(如二次绕组不为YN结或D结时),相当一次绕组A、B、C零相序空载,这时零序空载电流流过A、B、C三相,产生同相位零序磁通。它经过上铁轭、油间隙、油箱壁、下铁轭,回到心柱。由于磁通经过间隙,磁阻大,则励磁电流大,此时,依一次绕组由外到中到内(靠铁心),三心柱零序阻抗分别为50%、60%、70%,如表16-3中序号1、2的(1)、(2),序号6、7、8的(1)、(2)、(3)。对五心柱(含三台单相及壳式变压器)而言,A、B、C三相零序电流产生的零相序磁通经过三心柱后分别由旁轭、铁轭返回。磁通在铁心中成闭合回路,磁化电流小,则励磁阻抗高,因而不论一次绕组在外或中或内,励磁电流都一样。此时,零相序阻抗为10⁴%(与三相正相序励磁电流与阻抗相同),如表16-3中序号1、2五心柱的(1)、(2),序号6、7、8的五心柱(1)、(2)、(3)。

可见,空载零序阻抗与电源并联,为无安匝平衡的零序阻抗,故亦称并联零序阻抗,即励磁零序阻抗。

表16-3中某些联结(序号1、2、6、7、8)用“*”作标志,即是并联零序阻抗(空载)。

当一次零相序电流不能流通时,即相当开路,零序并联阻抗为无穷大,如表16-3中,序号1的(2)用“—”表示,只要是Y无中点,表16-3中均用“—”表示,如表16-3中,序号5的(1),即不存在。

上述零序阻抗的计算见表16-3。

2 串联(短路)零序阻抗

当一、二次绕组均能通过零序电流时,则一、二次绕组安匝可以平衡,此时的阻抗即为短路状态下的零序阻抗,如表16-3中序号5、12等,它在变压器等效线路中与电源串联,故称为串联零序阻抗。它为有安匝平衡的零序阻抗。

当把变压器的绕组接成三角形时,零序电流既不能从三角形流至与其相连的线路之中,也不能从线路中流入三角形。但零序电流却可以在接成三角形的绕组中环流,所以接成三角形的绕组,可以作为二次绕组零序电流的一个通路,只要有一个YN绕组励磁,它们就可组成短路零序阻抗,此时零序阻抗与正序短路阻抗有相同数量级。

YN联结的三相变压器,在二次绕组有电流时,等效线路图见图16-2。 X_1 、 X_2 分别表示一、二次绕组的短路电抗($X_1+X_2=X_k$, X_k 为一、二次绕组的短路电抗), X_m 为励磁电抗。

可以近似地认为 $X_1=X_2=X_k/2$,则绕组的零序电抗为:

$$X_0 = X_1 + \frac{X_2 X_m}{X_2 + X_m} = \frac{1}{2} X_k + \frac{1}{2} X_k \frac{1}{1 + \frac{X_k}{2X_m}} = \alpha X_k \quad (16-3)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{1}{1 + \frac{X_k}{2X_m}} \right] < 1$$

$$\text{式中 } X_m = \frac{U_N}{I_0};$$

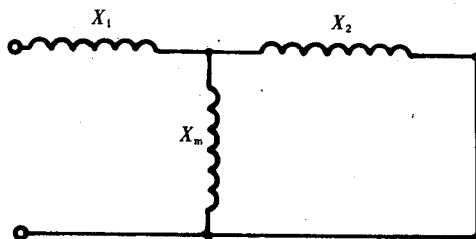


图16-2 等效电路(不计电阻)图

U_N ——额定电压, kV;

I_0 ——空载电流, A。

上式表示 $X_0 < X_k$ 。小于它对应短路阻抗, 这是IEC能设定表16-3零序阻抗典型值系数 α_1 、 α_2 和 α_3 的原因。

对五心柱(含三台单相及壳式变压器)变压器, 因每相有单独的磁回路, 则 $X_m \gg X_k$, 即 $\alpha=1$ 。对三心柱变压器, 因铁心中无磁回路, 零序磁通要经过油隙, 则 X_m 较五心柱为小, 与 X_k 在同一数量级上, 遂使 $\alpha < 1$ 。序号4、5的三心柱、五心柱, 分别用(1) $\alpha_1 Z_{12}$ 、(2) $\alpha_2 Z_{12}$ 与(1) Z_{12} 、(2) Z_{12} 表示, 序号9、10、11虽为三绕组, 但含Y, 可视为双绕组, 亦分别用(1) $\alpha_1 Z_{12}$ 、(2) $\alpha_2 Z_{12}$ 、(3) $\alpha_3 Z_{23}$ 及 Z_{12} 、 Z_{23} 表示。

对于三绕组变压器, 若一次绕组供电, 二、三次绕组短路(见图16-3), 则相当于二、三次绕组并联后与一次绕组串联, 于是 Z_0 为:

$$Z_0 = \alpha_1 (Z_1 + Z_2 // Z_3) \quad \text{三心柱}$$

$$(X_m \gg X_2, X_m \gg X_3)$$

$$\text{或 } Z_0 = Z_1 + Z_2 // Z_3 \quad \text{五心柱}$$

其他依此类推。

表16-3中序号12~18, 由于为D结故其下为“—”。

从IEC零序阻抗表, 只要知道短路阻抗, 很容易计算出零序阻抗。

表16-3中所列18种是比较典型的, 其他联结亦可按此类推。

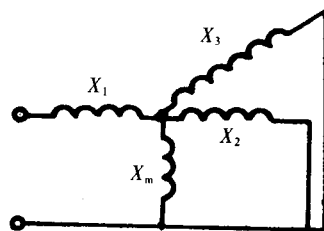


图 16-3 三绕组等效电路

第四节 零序阻抗测量实例

表16-3中的18种零序阻抗, 按绕组联结性质, 可归纳为三种, 见表16-4。表16-5为原沈阳变压器有限责任公司某产品试验数据。

表16-5中序号1表示表16-4序号1中的5种变压器; 序号2表示表16-4序号2中的9种变压器; 序号3表示表16-4中序号3的4种变压器。试验测得 Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{23} 对1绕组(HV)为 Z_{00} (A_m 、 B_m 、 C_m 开路)和 Z_{0c} (A_m 、 B_m 、 C_m 短路); 对2绕组(MV)为 Z'_{00} (A、B、C开路)和 Z'_{0c} (A、B、C短路), 而相对应的 Z_{00} 、 Z_{0c} 、 Z'_{00} 、 Z'_{0c} 则用式(16-1)、(16-2)计算。计算中取 $\alpha_1=0.85$ 、 $\alpha_2=0.9$ 、 $\alpha_3=0.95$ 。

表16-5中序号1三心柱, 由于没有YNY这种产品, 无法找到实测值, 对这类大变压器, 空载励磁电流约为0.1%, 这样 $Z_0=10^4$ 是合理的。

对三相五柱式变压器的零序阻抗亦得出了同样的结果。

表16-4 零序阻抗分类

序号	表16-3中序号	阻抗/%			
		三心柱		五心柱	
		(1)	(2)	(1)	(2)
1	1、2、6、7、8	50	60	10^4	10^4
2	4、3、5、9、10、11、14、16、17	αZ_{12}	αZ_{12}	Z_{12}	Z_{12}
3	12、13、15、18	$\alpha_1 (Z_1 + Z_2 // Z_3)$	$\alpha_2 (Z_2 + Z_1 // Z_3)$	$Z_1 + Z_2 // Z_3$	$Z_2 + Z_1 // Z_3$

表16-5 零序阻抗试验数据

序号	型号	连接组	电压/kV	电流/A
1	SFZ7-CY-20 000/220	YNyn0	$\frac{220 \pm 2 \times 2.5\%}{6.3}$	525/1 832.9
2	SFP7-75 000/220	YNd11	$\frac{242 \pm 2 \times 2.5\%}{10.5}$	178.9/4 124
3	SFPS7-90 000/220	YNyn0d11	$\frac{220 \pm 8 \times 1.25\%}{/121/38.5}$	$\frac{236.2/429.4}{/1 349.5}$
4	SSP7-450 000/330	YNd11	$363 \pm 2 \times 2.5\%/18$	715.72/14 433
5	SFPS8-120 000/220	YNyn0d11	$\frac{220 \pm 8 \times 1.25\%}{/121/10.5}$	$\frac{314.9/572.6}{/3 299.1}$

序号	实测值/%			实测值/ $\Omega \cdot \text{相}^{-1}$				计算值/ $\Omega \cdot \text{相}^{-1}$				注
	Z_{12}	Z_{13}	Z_{23}	Z_{∞}	Z_{oc}	Z'_{∞}	Z'_{oc}	$Z_{\infty}(Z_0)$	Z_{oc}	Z'_{∞}	Z'_{oc}	
1	—	—	—	1 905 ¹⁾				1 209/-36				三心柱
2	12.4	—	—	86.6					88.9/3			三心柱
3	14.18	23.8	7.95	102.7	65.6	12.02	7.96	108.5/6	64.4/-2	10.8/-10	6.93/-13	五心柱
4	15.7	—	—	45.5				45.8/1				三心柱
5	13.9	22.9	7.1	94.1	57.75	8.85	5.8	92.4/1.4	55.7/-3.5	8.66/-2	5.2/-10	五心柱

注:1. Z_{∞} 测量电压12 700V,电流20A,只为 $u/\sqrt{3}$ 的1/10。

2. 计算值栏分母为与实测值误差百分数。

第五节 小结

(1)IEC将变压器零序阻抗测量规定为特殊试验,并提出零序阻抗表。18种接法的变压器都可按此进行计算。

(2)对五心柱变压器 Z_{∞} 、 Z'_{∞} 计算值的偏差为 $\pm 10\%$ 。

(3)对三心柱变压器, α 系数在0.8~1,即不同结构的变压器有不同的 α 值,而计算只能取(估计)一个 α 定值,这样 Z_{∞} 、 Z'_{∞} 计算值就会比五心柱带来更大误差,大体在 $\pm 15\%$ 。

(4)由表16-5序号1可见,YNyn0计算 Z_{∞} 可超过30%的偏差是比较大的,这是由于IEC表示 $Z_0=50\%$ 定值,只是一个估计值或统计值,对不同容量的变压器会带来不同的偏差。

(5)IEC零序阻抗对事先估算变压器的 Z_0 、 Z'_0 或对已有的变压器估算 Z_0 、 Z'_0 都是很有用的,再用试验加以验证,供用户使用。

第十七章 短路承受能力试验

第一节 概 述

变压器短路承受能力试验,又称短路试验,俗称“突发短路试验”,是用于检验变压器承受短路事故能力的试验。

众所周知,电力变压器在系统内运行,难以避免地要发生单相、两相或三相短路事故。变压器由负载电流突然转变为短路电流,其值为额定电流的10倍~25倍,产生100倍~625倍的机械应力。产品如设计、制造不好,往往承受不住这么大的应力而发生损坏。由于变压器在输电、供电上的重要性,一台特大型变压器的损坏,要造成一个城市限电;一台配电变压器的损坏,会导致一个工厂、矿山停电。因而,制造厂做变压器的短路试验,以证明其耐受短路的能力,是电力部门十分关注的。

随着国民经济、工农业的发展,电力系统装机容量不断增长,系统短路容量大为提高,其相应的系统阻抗所占比例愈趋下降,加之单台变压器的容量增大,使变压器短路电流幅值增加,作用在变压器绕组上的机械力更大。这就是五六十年代变压器短路事故不多,而当前则很尖锐的缘故。

为确保变压器承受短路事故的能力,不能仅靠设计计算,而必须要通过专门的试验来验证。IEC标准和GB1094.5—2003国标都明确规定,变压器承受短路的动稳定能力应由试验验证或由计算和设计验证。

因此,短路承受能力试验是保证变压器抗短路能力的一项十分重要的特殊试验。

第二节 试验标准及要求

1 试验标准

GB1094.5—2003《电力变压器 第五部分 承受短路的能力》是变压器产品短路试验的国家标准。但对于出口产品一般应采用IEC60076-5:2000标准或其他国家标准。根据上述标准规定,变压器的短路试验为特殊试验。

特殊试验是指除型式试验和例行试验之外,经制造厂与使用部门商定的试验,它仅适用于一台或几台特定合同上的变压器。这是由短路承受能力试验的性质所决定的。它需要在专门的强电流试验站进行,且试验技术复杂,工厂难以具备试验条件。上述标准将变压器容量划分为三个类别:

第Ⅰ类:不大于2 500kVA;

第Ⅱ类:2 501kVA~100 000kVA;

第Ⅲ类:100 000kVA以上。

2 试验要求

2.1 系统短路表观容量

见表17-1。

2.2 短路电流允许偏差

峰值电流:±5%

有效值电流:±10%

2.3 持续时间及允许偏差

表17-1 系统短路表观容量

系统标称电压/kV	设备最高电压/kV	系统短路表观容量/MVA	
		2003 标准	1985 标准
6、10、20	7.2、12、24	500	500
35	40.5	1 500	1 500
66	72.5	5 000	3 000
110	126	9 000	8 000
220	252	18 000	15 000
330	363	32 000	30 000
500	550	60 000	43 300

I类 $0.5s \pm 10\%$ ($0.45s \sim 0.55s$)

II、III类 $0.25s \pm 10\%$ ($0.225s \sim 0.275s$)

2.4 试验次数

对于I类和II类单相变压器,试验次数为100%三次;三相变压器每相试验次数为100%三次,共九次。对于带有分接的I、II类单相变压器,三次试验应分别在两个极限分接和主分接上进行;对于III类变压器,其试验次数通常由制造厂与使用部门协商确定,但推荐单相变压器试验次数为三次;三相变压器试验次数共九次。

对三相变压器中间柱用主分接,一个旁柱用最大,另一个旁柱用最小。

对于带有分接的III类变压器,其试验所在分接位置通常由制造厂和使用部门协商确定,但建议与I、II类相同。

2.5 绝缘试验要求

重复绝缘试验应施加100%规定试验电压,如果规定了雷电冲击试验,则该试验应在重复例行试验后进行。

第三节 试验方法

1 试验前的准备工作

1.1 产品试验委托

企业需预先进行书面委托,并提供产品的技术文件。对60kV及以上产品,还要附上铁心、绕组、器身、总装、运输图等有关图纸(按STL的技术要求),所出的报告上要注明:工厂要按本台产品所列图样制造,达到试验合格。

1.2 准备试验方案

每一台变压器的试验都要准备试验方案,包括:选择用先短路或后短路方法,确定一次电压(U_0),确定串联电抗值(X_0),计算短路电流非对称相分量($\sqrt{2}KI_k$)与对称相分量(I_k),使之达到标准或用户委托书的要求。

一般短路试验都有典型方案表格。只需计算填写。对首次试验的II、III类产品,要有专门的试验方案,按统一格式填写,还应附有注意事项及安全措施,并要经过编制、校核、审批人员签字认可,才能予以实施。

试验方案一经批准,则由领班人员分工执行。它应是试验中的纲领性技术文件。如在执行中发现问题,需要修改时,则要请示试验站负责人批准修正改进后再执行。这种情况只在首次试验大产品时才会发生,一般产品经多次试验,有关人员已累积了丰富的经验。由于产品是多种多样的,即使最有经验的试验站,也会碰到新问题,这是技术发展的必然结果。问题是要不断地探讨,使研究技术成为风气,日益深入。

1.3 吊心检查、画线、拍照

试验之前,要吊心检查。为了便于与试验后的做比较,要画线。画线要分相进行,每相在高、低压两侧面绕组上(或围屏上)由上到下画线,线条的宽度为10mm。试验后再吊心检查,如绕组有轻微的位移,以10mm线不断为准,如不画线则难以判断。

试验前后吊心后均要在高、低压两侧拍彩色照片,其目的在于证实试验前后确已吊心检查,拍照存档。只有在严重损坏时,才可以从照片上看起来;不太严重的变形,是难以从照片上下结论的,甚至看不太出来。这时可用肉眼检查产品是否合格。此时,拍照仍然是试验程序中的一个环节,不能略去。

1.4 被试产品的准备

被试产品应是例行试验合格的产品。

被试产品运到试验站后,视产品大小做不同的处理,小产品完整运输,只需就位,大产品还要装套管、抽空、注油。

试验前的吊心、画线、拍照插在产品准备中进行。

产品就位后,预先短路三相低压端子(先短路法),或将三相低压端子接预短路装置(后短路法)。需要注意的是,短路铜线或铜排大小应与流过的短路电流相适应,并应紧固端子出头螺丝,绝不允许铜线或铜排通流能力不足,发生烧损事故。

三相(或两相)高压线要连好,对地距离要足够,以防止发生对地缺陷或放电事故,导致试验失败。

对有气体继电器的变压器应该装上气体继电器。试验后要检查是否有气体,作辅助判断。

1.5 电抗测量

试验前及每次试验后,都要做电抗测量,所有电抗测量的复验性应在0.2%之内。为此,应用一定精度的电桥,以便对试验前后测量值加以比较。

应该注意的是,在绕组受电力作用之后,或多或少要发生一点变形(微观的),因而电抗会有一些变化。如第3次试验后立即测量电抗,其变化超过2%,还可以停留24h,再次进行测量,如不大于2%,则仍认为电抗变化项合格。反之,则不合格。

2 短路试验电流的计算

2.1 理论分析

2.1.1 峰值系数的计算公式

变压器短路试验电流计算所用的等效电路如图17-1所示。

设短路试验合闸瞬间电源系统电压为:

$U = U_m \sin(\omega t + \alpha)$; $\frac{U_m}{Z} = \sqrt{2} \cdot I$; $\frac{X}{R} = Q$; $\varphi = \arctan Q$, 则图17-1中的短路试验电流为:

$$\begin{aligned} i &= \frac{U_m}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot \exp(-\frac{R}{X} \omega t)] \\ &= \sqrt{2} \cdot I [\sin(\omega t + \alpha - \arctan Q) - \sin(\alpha - \arctan Q) \cdot \exp(-\frac{\omega t}{Q})] = \sqrt{2} \cdot I \cdot K_1 \end{aligned}$$

由此可得 K_1 为:

$$K_1 = \sin(\omega t + \alpha - \arctan Q) - \sin(\alpha - \arctan Q) \cdot \exp(-\frac{\omega t}{Q}) \quad (17-1)$$

式中 α ——合闸相位角,°;

$\arctan Q$ ——试验电流滞后于电压的相位角,°;

Q ——试验回路的品质因数, $Q = \frac{X}{R} = \frac{X_s + X_1}{R_s + R_1}$;

K_1 ——峰值系数。

根据有关文献分析,当 $(\omega t + \alpha - \arctan Q) = \frac{\pi}{2}$ 时, K_1 计算公式可变为:

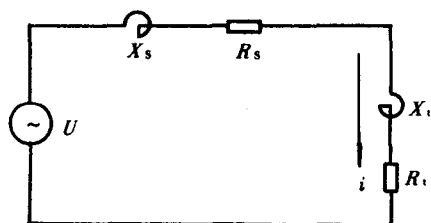


图 17-1 变压器短路试验电流计算等效电路图

X_1 —被试变压器等效电抗 X_s —电源系统等效电抗

R_1 —被试变压器等效电阻 U —电源系统电压

R_s —电源系统等效电阻 i —短路试验电流

$$K_2 = 1 - \sin(\alpha - \arctan Q) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\frac{\pi}{2} - \alpha + \arctan Q}{Q}\right)\right] \quad (17-2)$$

如果合闸相位角 α 等于零, K_2 计算公式又可简化为:

$$K_3 = 1 + \sin(\arctan Q) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\frac{\pi}{2} + \arctan Q}{Q}\right)\right] \quad (17-3)$$

根据有关文献对式(17-3)分析,当大容量变压器的 $Q \geq 6$ 时, $\arctan Q > 80^\circ$,此时,按 $\arctan Q \approx \frac{\pi}{2}$,得 $\sin(\arctan Q) \approx 1$,则 K_3 计算公式可进一步简化为:

$$K_4 = 1 + \exp\left(-\frac{\pi}{Q}\right) \quad (17-4)$$

由以上分析可知,当合闸相位角不等于零时应采用 K_1 或 K_2 公式计算峰值系数(K_1 为最大峰值系数);当合闸相位角等于零时应采用 K_3 公式计算峰值系数,当 $Q \geq 6$ 时也可采用 K_4 公式计算峰值系数。

2.1.2 峰值系数的计算结果

当合闸相位角等于零时,可采用 K_1 或 K_3 计算公式计算试验回路的峰值系数。当试验回路的 $Q \geq 6$ 时,也可采用 K_4 计算公式计算试验回路的峰值系数。 Q 值不同, K_3 与 K_1 和 K_4 与 K_1 之间产生的误差也不同。具体计算结果见表17-2。

当合闸相位角等于 $10^\circ \sim 50^\circ$ 时,可采用 K_1 或 K_2 计算公式计算试验回路的峰值系数。 Q 值不同,合闸相位角不同, K_1 与 K_2 之间产生的误差也不同。其具体计算结果见表17-3。

2.2 对称短路试验电流有效值的计算

按GB1094.5—2003标准规定,变压器对称短路试验电流有效值可用下式计算:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_s + Z_t)} \quad (17-5)$$

式中 Z_s ——系统阻抗, Ω ;

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}$$

U_s ——系统额定电压,kV;

S ——系统短路表观容量,MVA。

U 和 Z_t 按以下规定:

对于变压器主分接, U 为额定电压 U_N , Z_t 为:

$$Z_t = \frac{U_N^2}{S_N} \times U_k\%$$

表 17-2 K_1 、 K_3 、 K_4 峰值系数计算结果

Q	$\varphi/^\circ$	K_1	K_3	K_4	$\frac{K_3-K_1}{K_1}/\%$	$\frac{K_4-K_1}{K_1}/\%$
1	45	1.069	1.067	1.095	-0.187	2.432
2	63	1.242	1.235	1.264	-0.560	1.771
3	72	1.379	1.371	1.390	-0.580	0.798
4	76	1.477	1.471	1.485	-0.410	0.542
5	79	1.550	1.545	1.555	-0.320	0.323
6	81	1.606	1.601	1.609	-0.311	0.187
7	82	1.649	1.645	1.652	-0.243	0.182
8	83	1.684	1.681	1.686	-0.178	0.119
9	84	1.713	1.710	1.714	-0.175	0.058
10	84	1.737	1.734	1.738	-0.173	0.058
11	85	1.757	1.755	1.758	-0.114	0.057
12	85	1.774	1.773	1.776	-0.056	0.113
13	86	1.789	1.788	1.790	-0.056	0.056
14	86	1.803	1.801	1.803	-0.111	0

表 17-3 K_1 、 K_2 峰值系数计算结果

Q	$\varphi/^\circ$	K	合闸相位角 $\alpha/^\circ$					Q	$\varphi/^\circ$	K	合闸相位角 $\alpha/^\circ$				
			10	20	30	40	50				10	20	30	40	50
1	45	K_1	1.067	1.059	1.042	0.017	0.980	8	83	K_1	1.673	1.641	1.586	1.511	1.417
		K_2	1.065	1.057	1.041	1.017	0.983			K_2	1.671	1.638	1.585	1.510	1.417
		%	-0.187	-0.187	-0.096	0	0.306			%	-0.120	-0.183	-0.063	-0.066	0
2	63	K_1	1.237	1.221	1.192	1.151	1.095	9	84	K_1	1.702	1.668	1.612	1.535	1.437
		K_2	1.230	1.213	1.186	1.146	1.092			K_2	1.700	1.667	1.612	1.536	1.440
		%	-0.566	-0.655	-0.503	-0.434	-0.274			%	-0.118	-0.060	0	0.065	0.209
3	72	K_1	1.372	1.351	1.314	1.262	1.194	10	84	K_1	1.725	1.691	1.633	1.554	1.455
		K_2	1.365	1.345	1.311	1.261	1.195			K_2	1.722	1.687	1.629	1.560	1.450
		%	-0.510	-0.444	-0.228	-0.079	0.084			%	-0.174	-0.237	-0.245	-0.257	-0.344
4	76	K_1	1.469	1.445	1.402	1.343	1.266	11	85	K_1	1.745	1.710	1.651	1.570	1.469
		K_2	1.463	1.439	1.398	1.339	1.264			K_2	1.744	1.709	1.651	1.571	1.471
		%	-0.408	-0.415	-0.285	-0.298	-0.158			%	-0.057	-0.058	0	0.064	0.136
5	79	K_1	1.541	1.514	1.467	1.402	1.319	12	85	K_1	1.762	1.726	1.667	1.584	1.482
		K_2	1.536	1.510	1.465	1.401	1.320			K_2	1.760	1.724	1.664	1.580	1.478
		%	-0.324	-0.264	-0.136	-0.071	0.076			%	-0.114	-0.116	-0.180	-0.253	-0.270
6	81	K_1	1.596	1.566	1.517	1.447	1.360	13	86	K_1	1.777	1.741	1.680	1.597	1.493
		K_2	1.592	1.564	1.516	1.448	1.362			K_2	1.777	1.741	1.682	1.599	1.496
		%	-0.251	-0.128	-0.066	0.069	0.147			%	0	0	0.119	0.125	0.201
7	82	K_1	1.639	1.608	1.555	1.483	1.391	14	86	K_1	1.790	1.753	1.692	1.607	1.502
		K_2	1.635	1.605	1.553	1.482	1.391			K_2	1.789	1.752	1.691	1.607	1.502
		%	-0.244	-0.187	-0.129	-0.067	0			%	-0.056	-0.057	-0.059	0	0

式中 Z_i ——每相短路阻抗, Ω ;

S_N ——额定容量, MVA;

$U_k\%$ ——折算到参考温度时额定电流下的短路阻抗百分数。

对于变压器的其他分接

$$Z_i = \frac{U_x^2}{S_N} \times U_x\%$$

式中 U_x ——相应分接的分接电压, kV;

$U_x\%$ ——折算到参考温度时相应分接电流下的短路阻抗百分数。

对于小于等于 2500kVA 的第 I 类变压器, 如果系统的短路阻抗小于或等于变压器短路阻抗的 5%, 则计算时可将式 (17-5) 中的 Z_s 忽略不计。

如果变压器按 1.5 相试验, 则式 (17-5) 中每相阻抗 Z_i 和相电压 $\frac{U}{\sqrt{3}}$ 均应分别乘以 1.5。

2.3 非对称短路试验电流峰值的计算

非对称短路试验电流的第一个(最大)峰值按下式计算:

$$\hat{I} = K \cdot \sqrt{2} \cdot I \quad (17-6)$$

式中 I ——对称短路试验电流有效值(如 2.2 项计算), A;

K ——最大峰值系数(如 2.1.2 项计算);

$\sqrt{2}$ ——系数。

2.3.1 用标准规定的方法计算非对称短路试验电流峰值

按GB1094.5—2003标准规定,由 $Q=\frac{X}{R}$ 的比值确定 $K\sqrt{2}$,且当 $Q\geq 14$ 时对第Ⅱ类变压器取 $K\cdot\sqrt{2}=2.55$;对第Ⅲ类变压器取 $K\cdot\sqrt{2}=2.69$ 。当 Q 在1~14之间取值时,用线性插值法确定 $K\cdot\sqrt{2}$ 。

2.3.2 按2.1.1项推导的公式

计算非对称短路试验电流峰值

按2.1.1项推导计算 $K_1\cdot\sqrt{2}$ 、 $K_2(K_3)\cdot\sqrt{2}$ 、 $K_4\cdot\sqrt{2}$,结果见表17-4(按 $\alpha=0$ 计算)。

由表17-4计算结果可知:

$K\cdot\sqrt{2}$ 的值与 $K_1\cdot\sqrt{2}$ 的值

最接近,这说明标准规定的 $K\cdot\sqrt{2}$ 的值是用 $K_1\cdot\sqrt{2}$ 计算的。

当 $Q\geq 6$ 时, $K_4\cdot\sqrt{2}$ 的值与 $K\cdot\sqrt{2}$ 的值误差很小,所以在实际计算时,为了简化计算过程,可以采用 K_4 计算公式计算 K 值;当 $Q<6$ 时,最好采用 K_1 计算公式计算 K 值。

2.3.3 几种典型产品的 Q 值

为了准确计算峰值系数,除正确选择计算公式外,还必须准确计算公式中的 Q 值。下面给出几种典型产品的参考 Q 值(见表17-5)。

表 17-5 几种典型产品试验时的 Q 值

电压	容量/kVA	50	100	315	500	800	1 000	1 250	1 600		
10kV	Q	2.03	2.67	3.40	3.80	3.97	3.95	4.19	4.63		
电压	容量/kVA	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	5 000	6 300	8 000	10 000	12 500
35kV	Q	5.30	5.73	7.31	7.37	9.16	10.70	11.68	12.91	13.27	14.96
电压	容量/kVA	6 300	8 000	20 000	31 500	31 500 高一低	31 500 高一中	40 000	50 000	50 000 高一低	50 000 高一中
110kV	Q	15.66	15.54	17.47	21.49	29.88	18.92	23.02	21.22	38.16	23.83

3 短路试验电流的调试

3.1 短路试验电流的选择

变压器按预先短路方式进行试验。试验时对于第Ⅰ类容量的变压器可采用三相电源进行三相试验,也可采用两相电源进行单相或1.5相试验;对于第Ⅱ、Ⅲ类容量的变压器应采用两相电源进行单相或1.5相试验。

变压器短路试验时,被试变压器的容量应小于系统允许使用的容量。另外,除电源容量要满足试验要求外,电源(短路试验变压器)的输出电压和输出电流也应满足试验要求,且不允许短路试验变压器超铭牌运行。

3.2 调试电路

变压器短路试验电流调试时的等效电路见图17-2。

3.3 短路试验电流的调试

3.3.1 降低电流下的调试

降低电流调试的目的,一方面是为了验证试验回路电压和各试验参数是否合理,是否可以满足

有关标准和试验要求,另一方面是为了调试而确定可以满足非对称短路试验电流峰值要求的合闸相位角。

调试电流一般等于按2.2项计算出的电流值的50%~60%。为了保证调试电流和合闸相位角的准确可靠,首先应根据试验要求正确选择短路试验变压器的运行方式和分接;其次应根据所选短路试验变压器的运行方式和分接以及被试验变压器的参数,计算 Z_s 、 Z_T 、 Z_L 和 I ,看其是否可以满足

调试电流的要求。调试电流(I 和 \hat{I})和施加电压的测量应采用符合有关标准要求的测量系统。

现以国家变压器质量监督检验中心220kV网络和两台YLD-1200MVA/220kV/4×(40+16)kV短路试验变压器电源系统为例加以说明。调试时一般选择两台短路试验变压器一次绕组(220kV)串联,二次绕组[4×(40+16)kV]并联(二次绕组共有40个分接电压)。此时折算到短路试验变压器二次侧的系统阻抗 $Z_s = \frac{U_T^2}{Z_s}$;试验变压器阻抗 $Z_T = \frac{Z_{T1}}{2} \cdot (\frac{U_T}{220})^2$,输出电压为 $\frac{U_T}{2}$;被试变压器 Z_L 计算同2.2(1)项。由此可估算调试电流。最后再根据实测的调试电流试验证是否达到调试要求。

3.3.2 100%电流下的调试

100%对称短路试验电流有效值和非对称短路试验电流峰值的试验次数应严格按照有关标准要求,实测的两种短路试验电流的值及其偏差也应满足有关标准和试验要求。两种短路试验电流和施加电压的测量应采用符合有关标准要求的测量系统。

100%电流调试时,应将两台短路试验变压器的一次、二次绕组均串联(分接不变)。

正式试验前应对对称短路试验电流有效值和非对称短路试验电流峰值进行估算[见式(17-7)、式(17-8)]。当确认估算值可以满足有关标准和试验要求后方可正式进行100%电流下的试验。第一次100%电流下的试验可以按照调试时确定的合闸相位角进行选相,如能满足IEC标准和GB标准以及有关试验要求,可按此选相连续进行试验,直到结束。如不能满足上述有关标准和试验要求,或需要调整非对称短路试验电流峰值,则应重新调整串联电抗器的阻值或合闸相位角,直到满足有关标准和试验要求为止。最后根据实测的试验电流值验证试验电流偏差。

对称短路试验电流有效值可用下式估算:

$$I_t = \frac{U_T}{Z_s + Z_T + Z_L + Z_i} \quad (17-7)$$

式中 U_T ——短路试验变压器二次分接电压,V;

$$Z_s = \frac{2U_T^2}{S}$$

S ——220kV网络系统短路容量(按10 000MVA计);

Z_T ——折算到短路试验变压器二次侧的短路阻抗, Ω ;

$$Z_T = 2 \cdot Z_{T1} \left(\frac{U_T}{220} \right)^2$$

Z_{T1} ——短路试验变压器一次短路阻抗, Ω (实测);

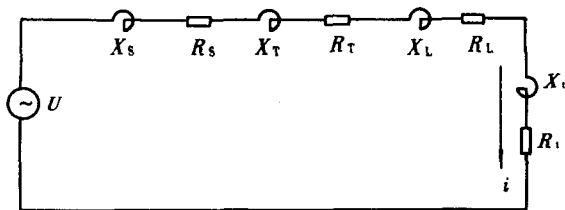


图 17-2 短路试验调试等效电路

X_T —折算到短路试验变压器二次侧的等效电抗 R_T —折算到
短路试验变压器二次侧的等效电阻 X_L —串联电抗器等效电
抗 R_L —串联电抗器等效电阻

Z_L ——串联电抗器短路阻抗, Ω (实测);

Z_c ——被试变压器短路阻抗(如2.2项计算), Ω 。

非对称短路试验电流峰值可用下式估算:

$$\hat{I}_i = \sqrt{2} \cdot K_i \cdot I_i \quad (17-8)$$

式中 K_i ——试验回路的峰值系数;

$$K_i = 1 + \exp\left(-\frac{R_s + R_T + R_L + R_i}{X_s + X_T + X_L + X_i} \pi\right)$$

I_i ——对称短路试验电流估算值, A。

4 试验合格的判断

见GB1094.5—2003标准4.2.7项。

第四节 试验实例

本节列出的试验实例依据的试验标准均为GB1094.5—1985。但国家变压器质量监督检验中心2004年及以后的短路试验已全部按GB1094.5—2003标准进行。GB1094.5—2003标准与GB1094.5—1985标准相比主要的不同是:100%峰值电流的试验次数(前者要求均为三次;后者要求一次为100%,其余二次不低于75%);系统短路表观容量;Ⅱ、Ⅲ类变压器试验的持续时间;Ⅲ类变压器电抗值的变化范围;短路试验后的绝缘试验要求。其他试验要求和方法均基本相同。

1 SSP8-50 000/110电力变压器

1.1 短路电流的计算与测量

短路电流的计算和测量值见表17-6、表17-7。持续时间0.192s~0.212s。

表17-6 短路电流计算值(参考温度:75℃)

分接位置	峰值电流值/A	对称电流值/A	倍数($K\sqrt{2}$)
1	4 983	1 954	2.55
3	5 276	2 069	2.55
5	5 454	2 139	2.55

表17-7 短路电流测量值

分接位置	A相			B相			C相		
	1	1	1	3	3	3	5	5	5
峰值电流值/A	4 680	4 860	4 500	5 021	4 320	4 050	4 560	5 040	5 310
对称电流值/A	1 846	1 899	1 910	1 974	1 984	2 005	2 090	2 090	2 090

试验波形无异常,试验波形图见图17-3。

1.2 短路试验前后的电抗测量

试验前后电抗测量值见表17-8。

试验前后最大电抗差为0.06%。

1.3 吊心检查

短路试验后绕组、引线和支撑件结构等无明显位移、变形,器身表面未发现放电痕迹。

1.4 复试例行试验合格

2 SC-16 000/35干式电力变压器

2.1 短路电流的计算与测量

在短路电流的计算和测量值见表17-9、表17-10。通电时间0.5s。试验波形无异常,试

表17-8 短路承受能力试验前后电抗测量值

分接位置	试验前电抗值/ Ω			试验后电抗值/ Ω		
	A0	B0	C0	A0	B0	C0
1	33.35			33.33		
3		30.21			30.20	
5			27.81			27.82

表17-9 短路电流计算值(参考温度:120℃)

分接位置	峰值电流值/A	对称电流值/A	倍数($K\sqrt{2}$)
1	6 814	2 672	2.55
3	7 148	2 803	2.55
5	7 507	2 944	2.55

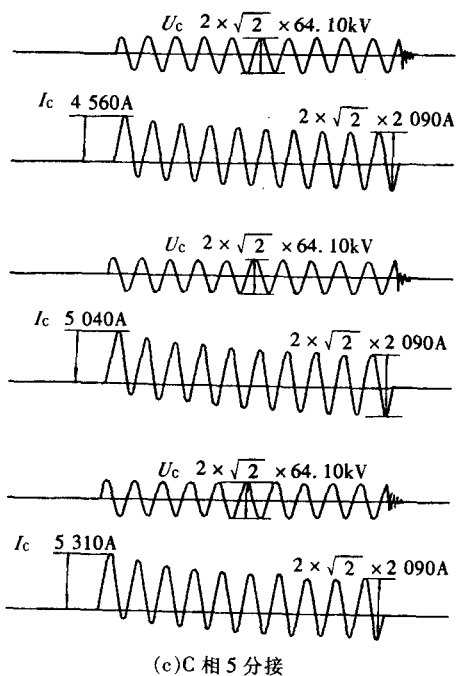
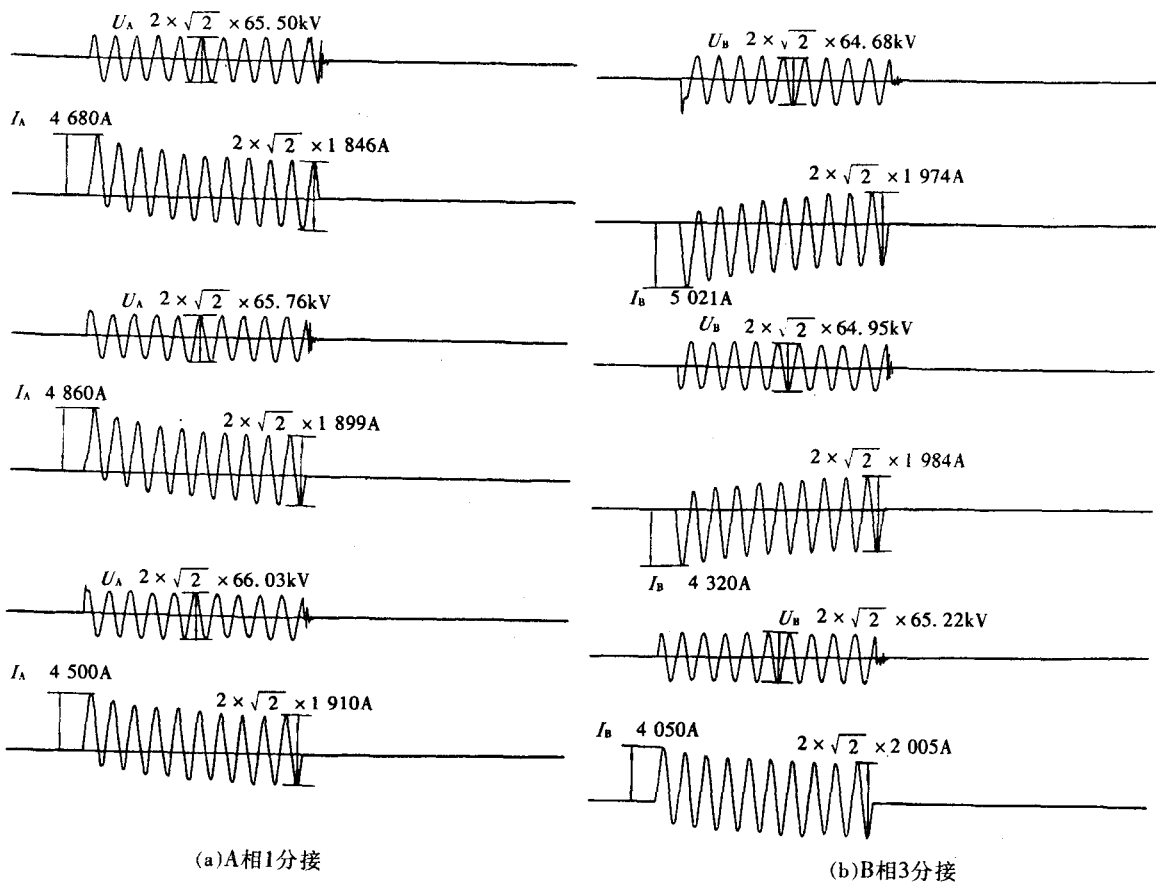


图 17-3 试验波形图

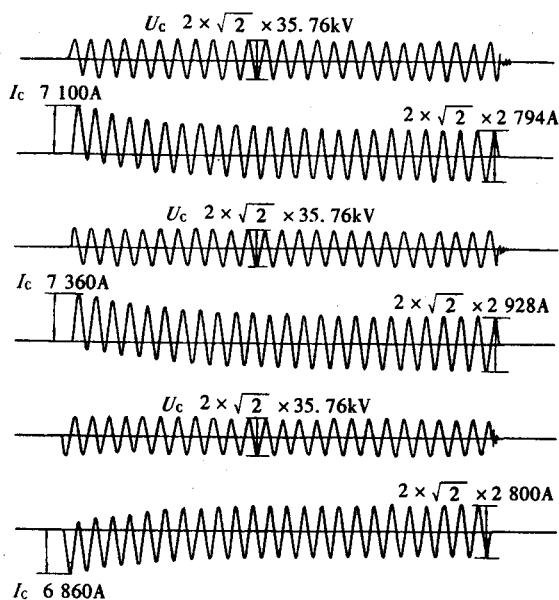
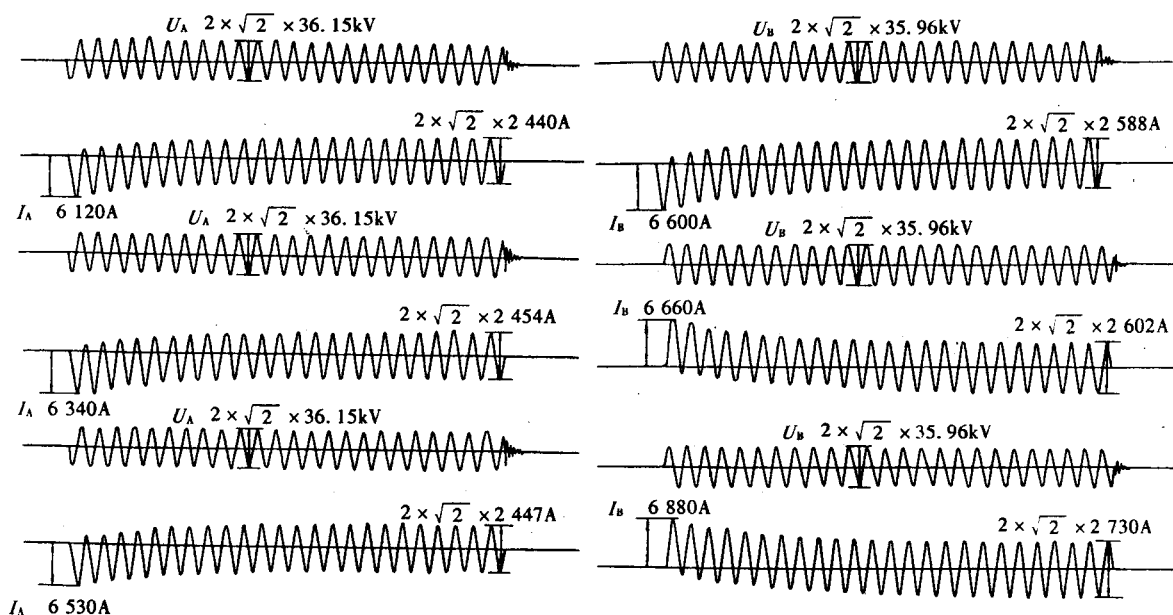


图17-4 试验波形图

表17-10 短路电流测量值

分接位置	A相			B相			C相		
	1	1	1	3	3	3	5	5	5
峰值电流值/A	6 120	6 340	6 530	6 600	6 600	6 880	7 100	7 360	6 860
对称电流值/A	2 440	2 454	2 447	2 588	2 602	2 730	2 794	2 928	2 800

验波形图见图17-4。

2.2 短路试验前后的电抗测量

试验前后电抗测量值见表17-11。

试验前后最大电抗差0.5%。

2.3 外观检查

短路试验后绕组、引线和支撑件结构等无明显位移、变形，器身表面没有发现放电痕迹。

2.4 复试例行试验合格

3 科研试验

为了进行科研，求得各种机械、结构数据，曾对一台SFZ8-50 000/110模型变压器进行了科研试验。

3.1 短路电流的计算

短路电流的计算值见表17-12。

3.2 试验情况

B相2分接第1次峰值电流为99%，时间为0.5s，波形正常，但电抗有变化，增大7.3%。

第2次峰值电流为94%，时间0.3s，电压波形在第11个周波衰减，电流波形同时增大。电抗减小29%。试验情况见表17-13，波形见图17-5。

表17-11 短路承受能力试验前后电抗测量值

分接位置	试验前电抗值/ Ω			试验后电抗值/ Ω		
	AB	BC	CA	AB	BC	CA
1	14.25	14.25	14.16	14.30	14.32	14.22
3	12.79	12.76	12.71	12.83	12.84	12.76
5	11.42	11.40	11.33	11.47	11.46	11.39

表17-12 短路电流计算值(参考温度:75℃)

分接位置	峰值电流值/A	对称电流值/A	倍数($K\sqrt{2}$)
1	5 250	2 060	2.55
2	5 990	2 350	2.55
3	6 400	2 510	2.55

表17-13 短路试验测量值

	峰值电流/A	对称电流/A	时间/s	波形	电抗
调试	3 480(55%)	1 290	0.5	正常	符合要求
第1次	5 925(99%)	2 350	0.5	正常	增大 7.3%
第2次	5 610(94%)	3 761	0.3	不正常	减小 29%

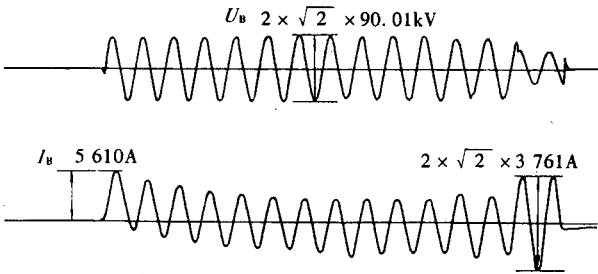


图17-5 试验波形图(B相2分接)

通过模型试验,对产品进行了结构分析与改进,从而使实际产品顺利通过了短路试验。

第十八章 声级测定

第一节 概 述

噪声是当今世界三大公害之一,严重地危害人们的工作、学习和生活。随着电力事业的发展,变压器容量越来越大,变压器的噪声也越来越大。世界各国对控制变压器噪声做了许多工作,都已把变压器声级测定列为特殊试验项目。变压器声级测定依据的标准为GB/T1094.10—2003《电力变压器 第10部分 声级测定》(等效IEC60076—10:2001标准)和JB/T10088—2004《6kV~500kV级电力变压器声级》。上述标准规定了变压器声级测量的两种方法:声压法和声强法,本章将对这两种测定方法进行论述。

第二节 与变压器噪声有关的声学基本参量

1 声波的产生和传播

声波是由于声源的振动而产生的,只有在一定频率范围内的振动才能被人的听觉感受到,这个频率范围是声频。频率在20Hz~20 000Hz的振动能被大多数人听到,在声频范围内的波动叫声波。声波是以空气为介质,以纵波形式传播到人的耳朵里。因此,频率低于20Hz的振动不能被大多数人听到,该声波叫次声;频率高于20 000Hz的振动也不能被大多数人听到,该声波叫超声。

2 声压与声压级

声波在运动时使空气压强发生变化,这种变化即空气压强与平均空气压强之差叫声压。实际声压(P)平方与基准声压(P_0)平方之比的对数乘以10叫声压级(L_p)。基准声压是普通人灵敏听觉起点的声压。

$$L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad (18-1)$$

式中 L_p ——声压级, dB;

P ——实际声压, Pa;

P_0 ——基准声压, $P_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa。

3 声强与声强级

表示通过某一指定位置处的净声能的大小和方向的矢量叫声强。

与测量表面垂直的声强分量叫法向声强,用 I_n 表示。

一般人的听觉所能感受的声强范围大约为 $(10^{-12} \sim 1) \text{ W/m}^2$ 。在声学中常用声强级描述声波的强度。实际的法向声强与规定的基准声强 I_0 之比的对数乘以10叫声强级 L_I 。基准声强相当于频率1 000Hz时人耳能感受的最弱声强。

$$L_I = 10 \log \frac{I_n}{I_0} \quad (18-2)$$

式中 L_I ——声强级, dB;

I_n ——实际声强, W/m^2 ;

I_0 ——基准声强, $I_0=1\times 10^{-12}\text{W}/\text{m}^2$ 。

4 声功率与声功率级

单位时间内通过某一面积的声能叫声功率,实际声功率(W)与基准声功率(W_0)之比的对数乘以10叫声功率级 L_w 。

$$L_w=10\log\frac{W}{W_0} \quad (18-3)$$

式中 L_w ——声功率级, dB;

W ——实际声功率, W;

W_0 ——基准声功率, $W_0=1\times 10^{-12}\text{W}$ 。

由于人的耳朵对声音的响应具有对数性,所以上述三个声学基本参量都具有对数性。

5 声音的叠加

在有两个或两个以上的声场中,任一点都将受到所有声源的作用,任一点的声压级是多个声源作用的声压级,但不是各个声源声压级的代数和,而是各个声压级的反对数和对数的对数,即:

$$L_p=10\log(10^{\frac{L_{p1}}{10}}+10^{\frac{L_{p2}}{10}}+\cdots+10^{\frac{L_{pn}}{10}}) \quad (18-4)$$

式中 L_p ——总声压级, dB;

L_{pn} ——各个声压级, dB。

由式(18-4)可知,两个相同声压级的噪声作用于同一点,总的噪声水平将增加3dB。两个噪声的声压级相差>10dB时,作用于同一点,总的噪声水平几乎等于较大声源的声压级。

图18-1为数个等声压级的总噪声水平。图18-2为不等的两噪声声压级的合成。

6 声音的衰减

在声场中,当声源尺寸很小时,可以将其看为一个点声源。试验表明,当距离增加一倍时,对点声源而言,声压级会减少6dB。

对变压器而言,变压器的体积是不小的,因此就不能将其作为一个点声源来处理。

7 听感曲线和计权网络

7.1 听感曲线

人耳是一种非线性器官,它把接收到的声压与频率结合起来。评价声音的大小这个量叫响度。

基准声选为频率为1 000Hz的纯音,它接近可听声音范围内各频率的几何平均值。如果有一个噪声听起来同该纯音一样响,则此纯音的声压级(dB)就是该噪声的响度级。

图18-3为ISO(国际标准化组织)听感曲线。该曲线是把各频率下等响音的声压级表示成等响度曲

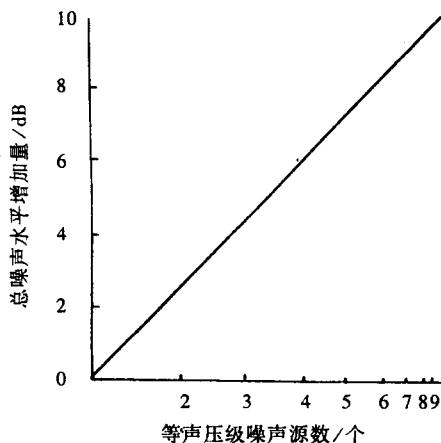


图18-1 等声压级的总噪声水平

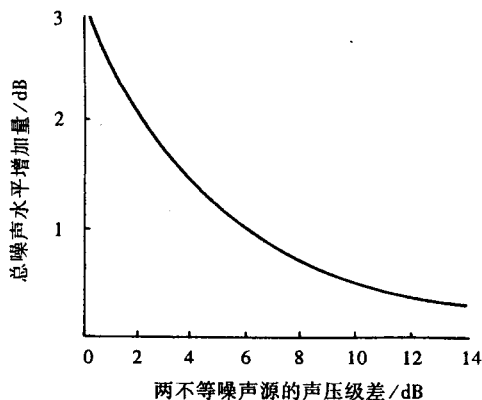


图18-2 不等的两噪声源的声压级合成

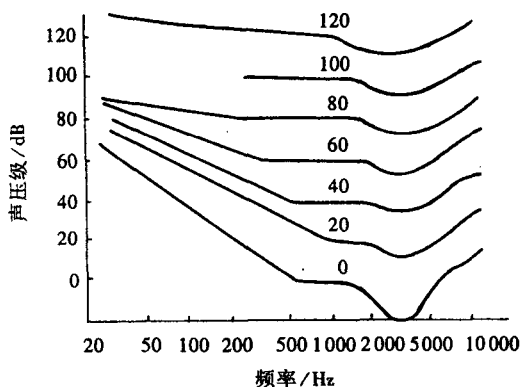


图18-3 ISO听感曲线

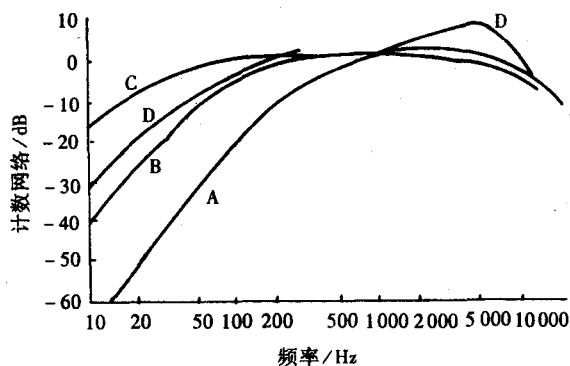


图18-4 计权网络的频率特性

线的形式。最下面一条零响度等响曲线就是各频率下的最小可听值,低于此值的声音人们听不见;最上面的曲线是各频率下的最大可听值,高于此值的声音对人有损害。

7.2 计权网络

由于噪声包含的频率复杂且没有规律,人耳对不同频率的声音感觉也不同,所以根据听感曲线对不同频率采取计权叠加的方法得到合成的总的声压级。对不同频率的声音进行不同程度的衰减,使不同频率的声压级值得到与听感曲线相适应的修正,修正后的声压级值叫噪声级或声级。计权方式主要有A、B、C三种:

A计权——在低频段有较大衰减,接近于人耳对小声音的响应;

B计权——介于A、C两计权中间,在低频段有一些衰减;

C计权——在声频范围都没有衰减,接近人耳对大声音的响应。

在上述三种计权中,最常用A计权来测量噪声(以下变压器的声级测量均采用A计权)。还有一种D计权。采用A、B、C三种计权,其测量得到的数值分别以dB(A)、dB(B)、dB(C)来表示。图18-4为计权网络的频率特性。

第三节 变压器的空载声级测量(声压法)

1 测量仪器

1.1 对测量仪器的要求

测量仪器应使用符合GB3785—1983《声级计的电、声性能及测试方法》所规定的1型声级计。测量变压器噪声要使用精密声级计,其应有A、B、C三种计权网络和快速显示,本身带有或能外接滤波器,同时应具有延伸电缆和防风罩、三角架等附件。用于测量大型变压器噪声的延伸电缆必须长于3m。为了减少变压器的磁场对于仪器的干扰,传声器必须用电容传声器。

1.2 国产噪声测量仪器

国内噪声测量仪器生产厂主要有三家,即江西吉安红声器材厂、湖南衡阳仪表厂、北京长城无线电厂。仪器名称、型号、用途等见表18-1。

1.3 进口噪声测量仪器

国外噪声测量仪器的著名厂家有丹麦B/K公司。该公司的产品在我国各行业都得到广泛使用。其名称、型号、用途见表18-2。

2 试验环境

表 18-1 国产噪声测量仪器

仪器名称	型 号	用 途	生产厂	参考价格/元
精密声级计	ND2,ND6	变压器声级测量	江西吉安红声器材厂	2 700
精密积分声级计	HS5670	变压器声级测量、环境噪声评价	江西吉安红声器材厂	10 000
精密脉冲声级计	HS5660A	变压器声级测量、脉冲噪声测量	江西吉安红声器材厂	3 500
精密声级计	JS-1	变压器声级测量	湖南衡阳仪表厂	2 800
精密脉冲声级计	HY122, HY123	变压器声级测量、脉冲噪声测量	湖南衡阳仪表厂	6 000
1/1倍频程滤波器	HS5721	频谱分析(配HS5660A)	江西吉安红声器材厂	2 400
1/3倍频程滤波器	HS5731	频谱分析(配HS5670)	江西吉安红声器材厂	6 240
1/1倍频程滤波器	NL-5	频谱分析(配JS-1)	湖南衡阳仪表厂	1 780
1/3倍频程滤波器	LB-2	频谱分析(配JS-1)	湖南衡阳仪表厂	4 200
带通滤波器	NL6	频谱分析	北京长城无线电厂	5 700
活塞发声器	NX6	声级计校准	江西吉安红声器材厂	900
活塞发声器	HF-1	声级计校准	湖南衡阳仪表厂	1 100
声级校准器	ND9	声级计校准	江西吉安红声器材厂	720
声级校准器	HY603	声级计校准	湖南衡阳仪表厂	950
声级校准器	JS6020	声级计校准	北京长城无线电厂	990

2.1 试验环境的背景声级

试验环境的背景声级应该尽量低,背景声级低于变压器声级10dB(A)最好。如果变压器加背景的合成声压级与背景的声压级之差<3dB(A)时,只有在变压器加背景的合成声压级小于保证值时,试验方有效,否则试验无效。

2.2 对试验环境的要求

试验环境应当是一个反射面之上的半自由场,合适的室外和普通的宽敞室内都可以作为试验环境。试验场地中除地面外,其他的反射体都应尽可能远离被测变压器。地面的吸声系数要<0.1。如果在室内测量,要求试验室的吸声量A与被测变压器的表面面积S的比值 $\frac{A}{S} \geq 1$, $\frac{A}{S}$ 越大越好。详细要求见GB/T1094.10—2003标准11.1项。

3 声级测量方法

3.1 测量位置的确定

在测量变压器噪声前,要先划定测量点,测量点是在距变压器基准发射面一定距离的水平线上布置的。视测量情况的不同按GB/T1094.10—2003列出表18-3布置测量点。干式变压器的测量轮廓线出于安全原因,应距离变压器发射表面1m。

测量点不得少于8个,相邻两点间的距离应近似相等,且不大于1m。

3.2 背景声级的测量

在被试变压器及附属装置不发声时进行背景声级测量。在对变压器进行声级测量的前后应及时测量背景声级。

当总的测量点数>10时,在变压器周围选择均匀分布的10个测量点上测量背景声级。当总的测

表18-2 丹麦B/K公司噪声测量仪器

仪器名称	型号	用 途
精密声级计	2235	变压器声级测量
精密积分声级计	2233	变压器声级测量
	2234	环境噪声评价
声分析仪	2260	噪声测量分析
1/1倍频程滤波器	1624	频谱分析
1/3倍频程滤波器	1625	频谱分析
活塞发声器	4220	声级计校准
声级校准器	4231	声级计校准

表18-3 变压器声级测量位置

变压器和冷却器安装情况		不带风冷却器的变压器或风冷却器单独安装在距离变压器基准发射面3m以上的情况		风冷却器直接安装在变压器油箱上或单独安装在距离变压器基准发射面<3m的情况	
测量项目		变压器声级测量	风冷却器声级测量	风冷却器和潜油泵停止运行时的变压器声级测量	风冷却器和潜油泵投入运行时的变压器声级测量
基准发射面的确定		从变压器的箱盖顶部到油箱底的垂直投影线及环绕变压器的轮廓线和弦线所形成的表面(包括固定在油箱的冷却设备及加强铁、电缆盒等,不包括高于箱盖的套管等突出物)	从风冷却器顶部到有效部分底部的垂直投影线及由环绕冷却器的轮廓线和弦线所形成的表面(不包括储油柜油管等次要附件)	从变压器油箱盖顶部到油箱底的垂直投影线及环绕变压器的轮廓线和弦线所形成的表面(包括风冷却器加强铁电缆盒等辅助设备,不包括高于箱盖的套管等突出物)	
轮廓线位置	水平方向	距离基准发射面0.3m	距离基准发射面2m	距离基准发射面0.3m	距离基准发射面2m
	高度	油箱高度<2.5m,在1/2油箱高度处;油箱高度≥2.5m,两条轮廓线分别在1/3和2/3油箱高度处	冷却器总高<4m(不包括储油柜油管等),在1/2高度处;冷却器总高≥4m,在1/3和2/3高度	油箱高度<2.5m,在1/2油箱高度;油箱高度≥2.5m,两条轮廓线分别在1/3和2/3油箱高度	

量点数<10时,应在每个测量点上测量背景声级。

测量背景声级时,测量点的高度应与测量变压器声级时的高度一致,测量点的位置在规定的轮廓线上。

3.3 测量时的运行条件

测量时,变压器在空载的状态下运行,以额定频率的正弦波额定电压励磁,分接开关置于主分接。

3.4 声级的测量方法

在测量前,对声级计使用活塞发声器或声级校准器进行校正。

对于不带风冷却器的变压器测量变压器声级。

对于带风冷却器而风冷却器安装距变压器基本发射表面>3m的变压器要分别测量变压器声级和冷却器声级。

对于风冷却器安装在变压器油箱上或风冷却器安装距变压器基本发射表面<3m的变压器要进行如下两次声级测量:

(1)变压器励磁,风冷却器和潜油泵退出运行时,测量变压器本体声级。

(2)变压器励磁,风冷却器和潜油泵投入运行时,测量变压器声级。

按制造单位与用户之间的协议,也可采用标准规定的其他供电组合方式。

在各测量点测量A计权噪声级,传声器正对基本发射面。人体尽量向后,避免人体对噪声反射的影响。

在风冷却器运行时测量,应在传声器上安装防风罩。

测量接受的准则见GB/T1094.10—2003标准表2。

4 声级测量结果计算

4.1 声级测量平均值的计算

(1)未修正的变压器和背景合成声级的平均值 $\overline{L_{PA0}}$

$$\overline{L_{PA0}} = 10 \log \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{PAi}} \right] \quad (18-5)$$

式中 $\overline{L_{PA0}}$ ——未修正的变压器和背景合成声级平均值, dB(A);

L_{PAi} ——第*i*个测量点上测得的合成声压级, dB(A);

N ——总测量点数。

(2)背景声级平均值 $\overline{L_{PA}}'$

$$\overline{L_{PA}}' = 10 \log \frac{1}{N'} \left[\sum_{i=1}^{N'} 10^{0.1 L_{PAi}'} \right] \quad (18-6)$$

式中 $\overline{L_{PA}}'$ ——背景声级平均值, dB(A);

L_{PAi}' ——第*i*个测点上的背景声级, dB(A);

N' ——背景声级测量点总数。

(3)修正的A计权合成声级平均值 $\overline{L_{PA}}$

$$\overline{L_{PA}} = 10 \log (10^{0.1 \overline{L_{PA0}}} - 10^{0.1 \overline{L_{PA}}'}) - K \quad (18-7)$$

式中 $\overline{L_{PA}}'$ ——两次背景声级中的较小者, dB(A);

K ——环境修正值, 见4.3(2)。

4.2 测量表面面积的计算

(1)不带冷却器的变压器和带风冷却器的变压器在变压器励磁、风冷却器和潜油泵停止运行时, 在距离基准发射面0.3m处测量, 测量表面面积*S*按下式计算。

$$S = 1.25 h L_m \quad (18-8)$$

式中 S ——测量表面面积, m²;

h ——变压器油箱高度, m;

L_m ——规定轮廓线的长度, m;

1.25——经验系数。

(2)带风冷却器的变压器在变压器励磁、风冷却器和潜油泵投入运行时及单独安装的风冷却器投入运行时, 在距离基准发射表面2m处进行测量时, 测量表面面积*S*按下式计算。

$$S = (h' + z) L_m \quad (18-9)$$

式中 h' ——变压器油箱高度或单独安装的风冷却器的高度, m;

L_m ——规定轮廓线长度, m;

z ——测量距离, m。

(3)干式变压器在距离基准发射表面1m处测量, 测量表面面积*S*按下式计算。

$$S = (h'' + l) L_m \quad (18-10)$$

式中 h'' ——变压器高度, m;

l ——测量距离, m。

4.3 环境修正值*K*的计算

考虑到反射声的影响, 要计算环境修正值*K*, 环境修正值最大为7dB(A)。

(1)吸音量*A*的估算

$$A = \alpha S_v \quad (18-11)$$

式中 A ——吸音量, m²;

α ——平均吸声系数(见表18-4);

S_0 ——试验室的总表面面积, m^2 。

(2) 环境修正值 K 的计算

$$K = 10 \log \left[1 + \frac{4}{(A/S)} \right] \quad (18-12)$$

式中 K ——环境修正值, $dB(A)$;

A ——吸音量, m^2 。

K 值也可以从图18-5查出。

4.4 声功率级的计算

变压器的 A 计权声功率级 L_{WA} 由式(18-13)计算。

$$L_{WA} = \overline{L_{PA}} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (18-13)$$

式中 L_{WA} ——声功率级, $dB(A)$;

$\overline{L_{PA}}$ ——修正后的声级, $dB(A)$;

S_0 ——基准表面面积, $S_0 = 1m^2$ 。

5 声级测量实例

5.1 SFP10-370 000/220 变压器声级测量

5.1.1 变压器技术规范

产品型号: SFP10-370 000/220

容量: 370 000kVA

电压比: $(220 \pm 2 \times 2.5\%) / 20kV$

励磁电压: 20kV

频率: 50Hz

5.1.2 测量点位置

被测变压器油箱高 H 为 4m。在油箱高度的 $1/3$ 和 $2/3$ 处测量, 测量点具体位置见图18-6。

5.1.3 测量仪器规范

精密声级计: 2203型

传声器型号: 4155型

仪器制造单位: 丹麦 B/K 公司

5.1.4 背景声级测量

试验前后的背景声级测量值见表18-5, 测量点位置在距变压器基本发射面 0.3m 的轮廓线上。表中的数值为 $1/3H$ 和 $2/3H$ 测量值的平均值。

5.1.5 变压器声级测量

(1) 变压器在额定电压励磁, 风冷却器及潜油泵停止运行时, 变压器本体噪声级测量值见表18-6。

表18-4 平均吸声系数 α

平均吸声系数 α	试验室状况
0.05	具有由混凝土、砖、灰泥或瓷砖构成平滑硬墙的房间
0.10	有平滑墙壁部分空着的房间
0.15	矩形的车间厂房
0.20	形状不规则的车间厂房
0.25	天棚或墙上铺有少量吸声材料的车间厂房
0.35	天棚或墙上铺有吸声材料的车间厂房
0.50	天棚或墙上铺有大量吸声材料的车间厂房

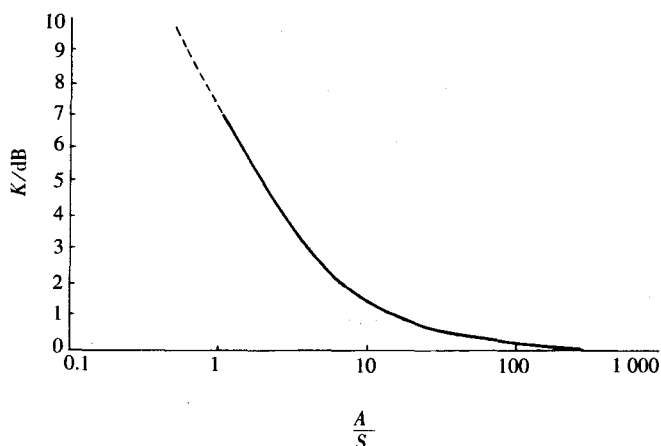


图18-5 环境修正值 K

表18-5 背景声级测量值

	dB(A)									
测量位置	1	3	5	7	9	11	13	15	19	22
测量前	52.4	52.2	52.6	52.3	52.5	52.8	52.6	52.4	52.7	52.3
测量后	53.2	53.0	53.2	53.5	53.1	53.4	53.0	53.1	53.4	53.7
平均值	52.9									

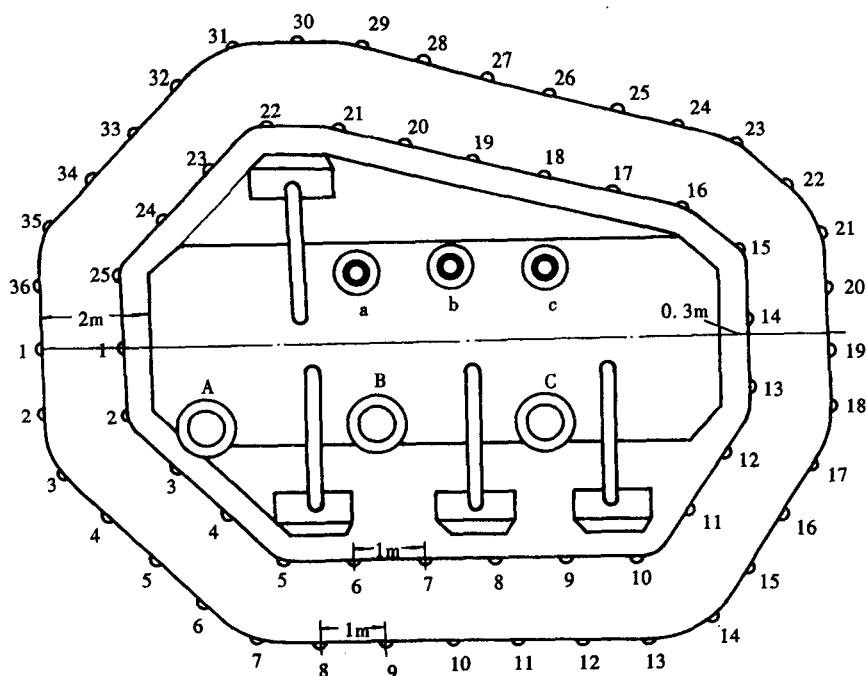


图18-6 SFP10-370 000/220变压器声级测量平面图

表18-6 变压器声级测量值

dB(A)

测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H
1	70.4	70.8	6	72.1	72.8	11	70.2	70.0	16	71.0	71.4	21	71.9	71.6
2	69.9	70.7	7	71.9	71.3	12	69.8	69.3	17	71.6	72.0	22	70.8	71.3
3	70.5	71.6	8	71.6	71.9	13	69.2	69.7	18	71.9	72.3	23	70.2	70.6
4	71.4	71.9	9	71.1	71.7	14	70.1	70.4	19	72.4	71.9	24	70.3	70.8
5	72.0	72.4	10	70.5	70.9	15	70.7	69.8	20	72.1	72.6	25	69.8	70.3

注:平均值:71.2dB(A)

(2)变压器在额定电压励磁,风冷却器及潜油泵投入运行时,变压器声级测量值见表18-7。

表18-7 变压器声级测量值

dB(A)

测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H
1	76.0	76.9	7	78.5	78.0	13	80.9	80.4	19	77.6	77.0	25	77.2	77.8	31	79.7	80.1
2	76.8	77.3	8	78.4	78.9	14	79.6	79.9	20	77.9	77.4	26	77.0	77.5	32	78.9	79.4
3	77.5	77.1	9	79.2	79.7	15	79.0	79.5	21	77.1	77.5	27	77.7	78.1	33	78.2	78.6
4	77.8	77.5	10	79.6	80.3	16	78.4	78.1	22	76.8	77.3	28	77.3	78.0	34	77.8	78.2
5	77.9	78.2	11	79.2	80.5	17	77.8	78.0	23	76.4	77.1	29	77.9	78.2	35	77.0	77.5
6	78.2	78.8	12	79.9	80.7	18	77.5	77.9	24	76.9	76.5	30	79.3	78.9	36	76.5	77.2

注:平均值:78.3dB(A)

5.1.6 校正值的计算

(1)背景声级的校正值X

冷却器停运时:71.2-52.9=18.3dB(A)

冷却器运行时: $78.3-52.9=25.4\text{dB(A)}$

因为差值均 $>10\text{dB(A)}$,故背景声级校正值 $X=0$

(2)环境校正值 K

试验大厅尺寸:长=102m,宽=30m,高=30m

试验大厅表面积:

$$S_v=2\times(102\times30+30\times30+30\times102)=14\,040\text{m}^2$$

吸音系数: $\alpha=0.15$

试验大厅的吸音量 $A=\alpha S_v=0.15\times14\,040=2\,106\text{m}^2$ 。当冷却器停运时,轮廓线周长 $P_{m1}=25\text{m}$,变压器高 $H=4\text{m}$ 。

根据式(18-8)计算得到变压器有效表面积 S_1 :

$$S_1=1.25HP_{(m)}=1.25\times4\times25=125\text{m}^2$$

根据式(18-12)计算得到环境校正值 K_1 :

$$K_1=10\log\left(1+\frac{4}{A/S_1}\right)=10\log\left(1+\frac{4}{2\,106/12.5}\right)=0.93\text{dB(A)}$$

当冷却器运行时,轮廓线周长 $P_{m2}=36\text{m}$,变压器油箱高 $H=4\text{m}$ 。

根据式(18-9)计算得到变压器有效表面积 S_2 :

$$S_2=(h+2)P_{m2}=(4+2)\times36=216(\text{m}^2)$$

根据式(18-12)计算得到环境校正值 K_2 :

$$K_2=10\log\left(1+\frac{4}{A/S_2}\right)=10\log\left(1+\frac{4}{2\,106/216}\right)=1.49\text{dB(A)}$$

5.1.7 校正后的变压器声级值

(1)当冷却器停运时,变压器声级值

$$L_{p1}=\overline{L}_{p1}-X_1-K_1=71.2-0-0.93=70.3\text{dB(A)}$$

(2)当冷却器运行时,变压器声级值

$$L_{p2}=\overline{L}_{p2}-X_2-K_2=78.3-0-1.49=76.8\text{dB(A)}$$

5.1.8 变压器的A计权声功率级 $L_w(\text{A})$

根据式(18-13)计算出变压器的A计权声功率级 $L_w(\text{A})$ 。

(1)当冷却器停运时:

$$L_w(\text{A})_1=L_{p1}+10\log S_1=70.3+10\log 125=91\text{dB(A)}$$

(2)当冷却器运行时:

$$L_w(\text{A})_2=L_{p2}+10\log S_2=76.8+10\log 216=100\text{dB(A)}$$

5.2 SFZ8-31 500/110变压器声级测量

5.2.1 变压器技术规范

容量:31 500kVA

电压比:110 \pm 3 \times 1.25%/10.5kV

联结组:YNd11

5.2.2 冷却器规范

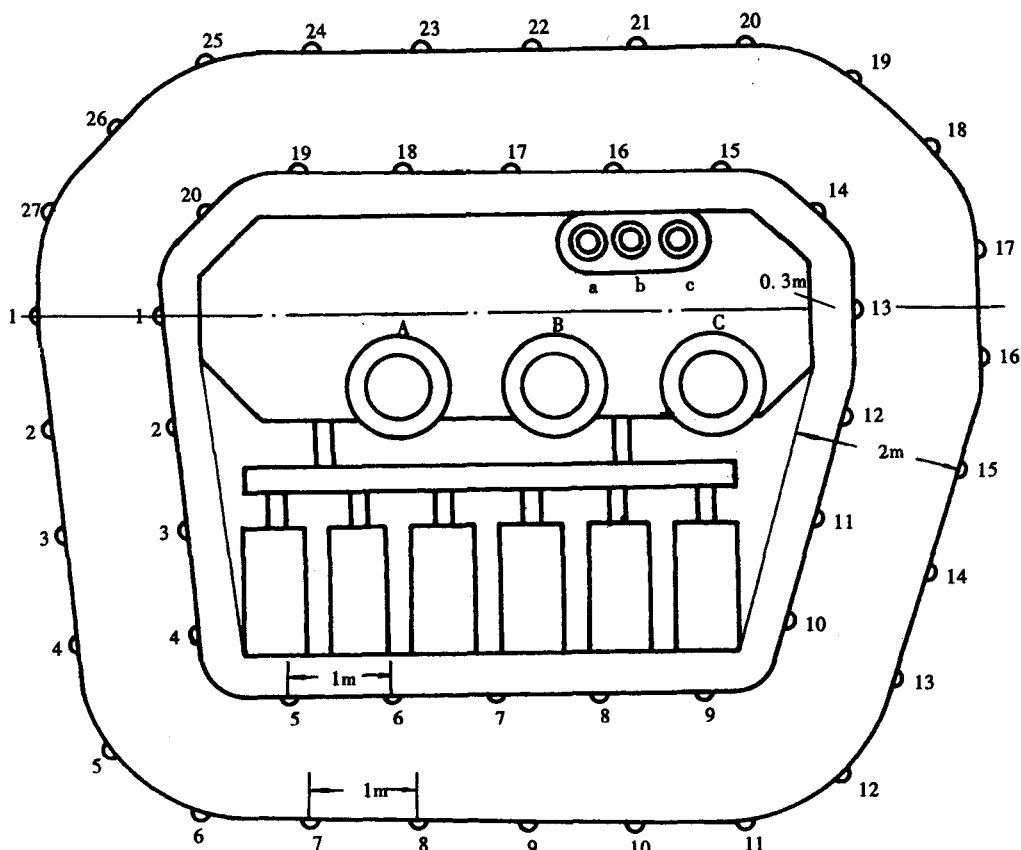


图18-7 SFZ8-31 500/110变压器声级测量平面图

片式散热器

数量:6组

5.2.3 测量仪器规范

制造单位:丹麦B/K公司

仪器型号:2230型精密声级计

传声器型号:4155

测量点位置见图18-7。

5.2.4 试验条件

励磁电压:10.5kV

频率:50Hz

分接:主分接

5.2.5 声级测量

背景声级测量值见表18-8, 变压

器本体声级测量值见表18-9。

5.2.6 声级计算(当吹风散热器停运时)

平均值: $L_p=67.2\text{dB(A)}$

背景声级的校正 $X=0\text{dB(A)}$

表18-8 背景声级测量值

dB(A)

测量位置	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
测量前	54.3	53.8	54.0	54.3	53.9	54.4	53.8	53.9	53.5	53.1
测量后	54.7	54.9	55.1	54.5	54.9	55.4	55.2	54.9	55.0	54.6
平均值	54.5									

表18-9 变压器声级测量值

dB(A)

测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H
1	66.9	67.3	5	66.5	66.8	9	66.2	66.8	13	67.0	66.5	17	68.7	69.0
2	66.2	66.8	6	67.0	66.6	10	66.7	66.1	14	67.3	67.8	18	68.1	68.3
3	65.9	65.1	7	67.3	67.5	11	66.0	66.3	15	67.7	68.0	19	68.2	68.5
4	66.2	66.7	8	66.9	67.4	12	66.4	66.8	16	68.3	68.8	20	67.5	67.8

注:平均值:67.2dB(A)。

环境校正值 $K=0.5\text{dB(A)}$

校正后的变压器声压级 (L_p-X-K) $=66.7\text{dB(A)}$

有效表面积:距基准发射面 0.3m 处测量, 70.5m^2

A计权声功率级:85.2dB(A)

5.2.7 声级计算(当吹风散热器运行时)

变压器声级测量值见表18-10。

平均值: $L_p=73.3\text{dB(A)}$ 背景声级的校正值: $X=0\text{dB(A)}$ 环境校正值: $K=0.9\text{dB(A)}$ 校正后的变压器声级(L_p-X-K) $=72.4\text{dB(A)}$ 有效表面积:距基准发射面 2m 处测量: 130m^2

A计权声功率级:93.5dB(A)

5.3 SC-1 000/10千式变压器声级测量

5.3.1 变压器技术规范

容量:1 000kVA

电压比:10 \pm 5%/0.4kV

联结组:Yyn0

5.3.2 测量仪器规范

制造单位:丹麦B/K公司

仪器型号:2203型声级计,

传声器型号:4165

测量点位置见图18-8。

5.3.3 试验条件

励磁电压:10kV

频率:50Hz

分接:主分接

5.3.4 声级测量

背景声级

背景声级测量值见表18-11,变压器声级测

表18-10 变压器声级测量值

dB(A)

测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H	测量位置	1/3H	2/3H
1	72.8	72.1	10	74.9	74.4	19	71.5	71.1
2	73.4	73.0	11	74.2	74.8	20	71.9	72.3
3	73.1	73.7	12	74.5	73.9	21	72.2	72.6
4	73.5	73.2	13	73.7	73.2	22	72.7	72.0
5	74.0	73.4	14	74.1	73.5	23	73.0	72.6
6	74.2	73.8	15	73.2	73.7	24	72.9	73.3
7	74.6	74.1	16	73.6	72.6	25	72.7	73.1
8	74.2	74.9	17	72.8	72.4	26	72.4	72.8
9	74.7	74.3	18	72.2	72.8	27	72.5	72.9

注:平均值:73.3dB(A)。

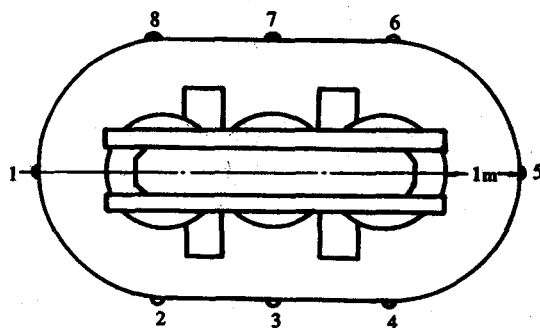


图18-8 SC-1 000/10变压器声级测量平面图

表18-11 背景声级测量值

dB(A)

测量位置	1	2	3	4	5	6	7	8
测量前	41.2	41.5	41.3	41.7	41.4	41.6	41.1	41.5
测量后	41.8	41.6	41.9	42.1	41.7	41.9	41.5	42.0
平均值	41.6							

量值见表18-12。

5.3.5 变压器声级计算

声级计读数的平均值: $L_p=48.4\text{dB(A)}$

背景声级的校正值: $X=1\text{dB(A)}$

环境校正值: $K=0.3\text{dB(A)}$

校正后的变压器声级: $(L_p-X-K)=47.1\text{dB}$

(A)

有效表面积: 距基准发射面1m处的测量, 17.7m^2

A计权声功率级: 59.6dB(A)

表18-12 变压器声级测量值 dB(A)

测量位置	声级/dB(A)	测量位置	声级/dB(A)
1	48.2	5	48.5
2	48.8	6	48.8
3	48.4	7	48.6
4	48.0	8	48.3

注: 平均值 48.4dB(A) 。

第四节 变压器的负载声级测量(声压法)

根据GB/T1094.10—2003《电力变压器 第10部分: 声级测量》标准规定, 变压器的负载条件应由制造单位和用户在订货时协商确定。若一台变压器的空载声级很低, 则运行时的负载电流所产生的噪声可能影响变压器的总声级, 此时应对变压器负载电流下的声级进行测量, 并将空载声功率级和负载电流声功率级相加, 此值即为变压器在额定电压、额定电流下的声功率级(负载声级)。

1 负载电流下的声级测量

1.1 额定电流和短路电压下声级测量

为了判断负载电流下的声级测量是否必要, 可先通过下式粗略估算负载电流下的声功率级:

$$L_{\text{WA,IN}} \approx 39 + 18 \log \frac{S_r}{S_p} \quad (18-14)$$

式中 $L_{\text{WA,IN}}$ ——变压器在额定电流、额定频率及短路阻抗下的A计权声功率级, dB(A) ;

S_r ——变压器的额定容量, MVA ;

S_p ——基准容量, 1MVA 。

若 $L_{\text{WA,IN}}$ 比保证值低 8dB 或更多时, 则负载电流下的声级测量不必进行。

当需要进行负载电流下的声级测量时, 应将变压器的一个绕组短路, 对另一个绕组施加标准规定的额定频率的正弦波电压, 并使绕组中通过额定电流。此时应按空载声级测量方法测量负载电流下的声级, 其测量仪器、测量环境条件、测量位置、测量方法、负载电流下的声级和声功率级计算等均同空载声级测量。

1.2 降低负载电流下的声级测量

如果只能在降低负载电流下进行声级测量, 则额定电流下的声功率级应按下式计算:

$$L_{\text{WA,IN}} = L_{\text{WA,IT}} + 40 \log \frac{I_N}{I_T} \quad (18-15)$$

式中 $L_{\text{WA,IN}}$ ——额定电流下的A计权声功率级, dB(A) ;

$L_{\text{WA,IT}}$ ——降低电流下的A计权声功率级, dB(A) ;

I_N ——额定电流, A ;

I_T ——降低电流, A 。

2 空载声功率级和负载电流声功率级的合成计算

对于在额定电压和额定电流下运行的变压器, 其A计权声功率级可由下式计算:

$$L_{\text{WA,SN}} = 10 \log (10^{0.1L_{\text{WA,IN}}} + 10^{0.1L_{\text{WA,SN}}}) \quad (18-16)$$

式中 $L_{\text{WA,SN}}$ ——额定电压、额定电流下的A计权声功率级(负载声级), dB(A) ;

$L_{WA,UN}$ ——额定电压、空载电流下的A计权声功率级(空载声级),dB(A);

$L_{WA,IN}$ ——额定电流下的A计权声功率级(负载电流声级),dB(A)。

第五节 声强测量简介

本章第二、三节介绍了变压器声级测量的声压测量方法,根据GB/T1094.10—2003标准规定,变压器的声级测量也可采用声强测量方法。

1 声强测量方法的原理

测量声强的现行方法是用两个相位匹配的传声器,其相隔距离应比被测最短声波的波长还要小些。用有限差分法求得两个传声器之间中点处的声压梯度及相应的质点速度。从有双传声器的声强探头得到测量信号,再将该信号加到双通道FFT分析仪进行信号处理,可以得到声强。

2 声强测量方法的优点

通过测量声强可以确定声传播方向,判断噪声源位置,并可进行故障诊断。在测量噪声源辐射功率时,可以不必进行环境修正,就可以达到较高的测量精度。特别当背景噪声较高时,仍然可以测出被测产品的噪声水平。

对变压器而言,可以在电站或变电所测出负载条件下的变压器噪声。在背景噪声较高的车间或试验室,可以对低噪声变压器声级进行测量,还可以直接测出变压器的声功率。

3 声强测量仪器

在20世纪30年代,工业发达的国家已开始进行声强测量的研究,80年代初,国外已生产了声强测量仪器。我国在80年代末也研制了声强测量仪器。目前主要的声强测量仪器见表18-13所示。

表18-13 声强测量仪器

仪器名称	型号	生产单位
声强计	HS5990	江西吉安红声器材厂
声动态分析仪	SH802	湖南衡阳仪表厂
声分析仪	2260	丹麦B/K公司

4 平均声强级计算

平均声强级 \overline{L}_{IA} 按下式计算:

$$\overline{L}_{IA} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sign}(L_{IAi}) 10^{0.1|L_{IAi}|} \right] \quad (18-17)$$

式中 \overline{L}_{IA} ——平均A计权声强级,dB(A);

L_{IAi} ——变压器供电时于各点上测得A计权法向声强级,dB(A)。

5 声功率级计算

声功率级可按下式计算:

$$L_{WA} = \overline{L}_{IA} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (18-18)$$

式中 L_{WA} ——A计权声功率级,dB(A);

\overline{L}_{IA} ——平均A计权声强级,dB(A);

S ——测量表面面积,m²;

S_0 ——基准参考面积,1m²。

第十九章 空载电流谐波测量

第一节 概 述

GB/T 1459—1993《电能质量 公用电网谐波》中对谐波及谐波含量的概念和含义作了明确的规定,变压器空载电流谐波测量没有相应标准规范,可直接引用该标准定义。

1 基波

对周期性交流量进行傅立叶级数分解,得到频率与工频相同的分量。

2 谐波

对周期性交流量进行傅立叶级数分解,得到频率为基波频率大于1的整数倍的分量。

3 谐波次数

谐波频率与基波频率的整数比。

4 谐波含量

从周期性交流量中减去基波分量后所得到的量。电流谐波含量以 I_h 表示, $I_h = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}$, I_h 为第 h 次电流谐波分量的方均根值。

5 谐波含有率(HR)

周期性交流量中含有的第 h 次谐波分量的方均根值与基波分量的方均根值之比(用百分数表示)。第 h 次电流谐波含有率以 HRI_h 表示。 $HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\%$

6 总谐波畸变率(THD)

周期性交流量中的谐波含量与其基波分量的方均根值之比(用百分数表示)。 $THDi = \frac{I_h}{I_1} \times 100\%$

第二节 变压器空载电流谐波产生机理

变压器空载电流主要由励磁电流 I_m (无功分量)及铁损电流 I_w (有功分量)两部分组成,铁损电流一般情况下所占比重较小,不到励磁电流 I_m 的 10%,且其不影响空载电流中的谐波成分。所以在分析变压器空载电流谐波问题时可以忽略铁损电流的影响,而将铁心励磁电流看作变压器空载电流。

图 19-1 是理想化的变压器铁心励磁特性曲线。在铁心处于非饱和状态时,铁心励磁曲线为线性,如果外施励磁电压为正弦波,则变压器空载电流也为正弦波,此时空载电流谐波含量几近为零。但进行变压器设计时,考虑到性能价格比,铁心磁密不可能选择得过低,所以在变压器处于额定励磁电压时,空载电流中一般均有可观的高次谐波含量。一般以三、五、七次谐波含量为最大,此时空载电流波形不再是正弦波形,其波形示意图如图 19-2 所示。

以上仅限于笼统的理论分析,并未考虑到变压器的结构特点。其实,对于单相变压器而言,由于其磁路独立,电路也相对独立,其空载电流中的各次谐波分量不受其他支路影响,其实际的空载

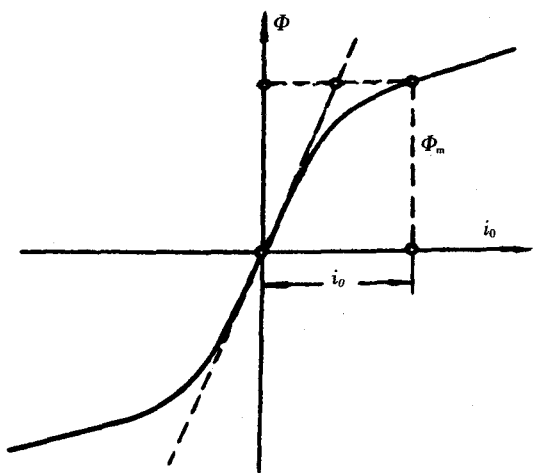


图 19-1 铁心励磁曲线

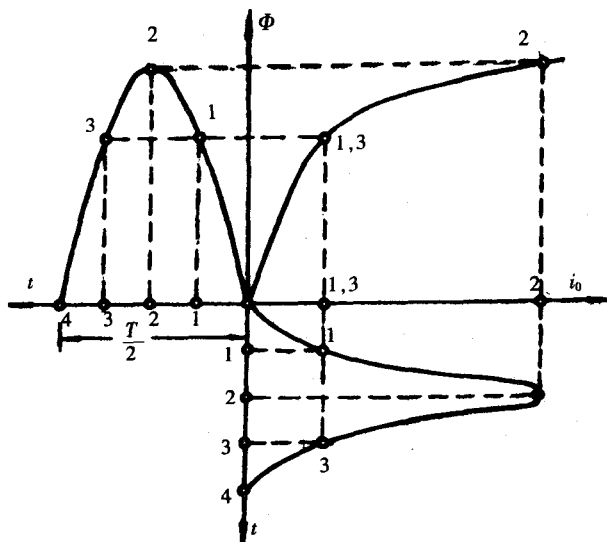


图 19-2 空载电流波形

电流谐波含量与基础电工理论基本相符,三次谐波含量最大。但对于三相变压器而言,无论其三相绕组是何种联结方式,其三相磁路及三相电路均会形成一个相互联系相互影响的网络,这样,在分析三相变压器的空载电流谐波含量时,如果忽略变压器铁心的材料性能和结构特点,得出的结论将会严重偏离实际情况。比如说三相电力变压器空载电流三次谐波含量问题,若仅从电工基础来讲,由于三相基波之间相角为 120° ,三相之间的三次谐波应该是同相位同大小,对于三相三线供电系统来说,无论联结组如何,其线电流中均不应存在三次电流谐波分量。这是因为对于 Y 联结的励磁绕组,同相位同大小的三次谐波电流无法流通;而对于 D 联结的励磁绕组,同相位同大小的三次谐波电流将沿闭合三角形回路流通。但实际情况却并非如此,从采用三相三线电源对三相电力变压器供电进行谐波测量的结果来看,不论励磁绕组是 Y 联结或 D 联结,变压器空载电流中均含有可观的三次谐波电流分量。

三相电力变压器空载电流中所含有的三次谐波电流分量主要是由于变压器三相磁路不对称引起的,对于三相三柱式电力变压器而言,B 相磁路较 A、C 两相磁路明显要短,再加上三相励磁电压并非绝对平衡对称,造成三相的三次谐波电流并非完全大小相等相位相同,因此,三次谐波电流并非完全不能流通,而是仍可以部分流通,流通的三次谐波电流分量仍符合 $I_A + I_B + I_C = 0$ 的关系。只是每相流通的三次谐波电流幅值不相同而已。

通过对大量的电力变压器空载电流谐波测量结果的分析,很容易发现这样一种现象,对单相电力变压器而言,一般来说,三次谐波电流分量远高于其他高次谐波电流分量,占谐波成分的主导地位。而对三相电力变压器而言,一般来说,以五次谐波电流分量为最大,且 C 相谐波电流含量较之其他两相明显偏低。

第三节 空载电流谐波的测量原理和测量仪器

由于变压器铁心励磁电流和励磁电压的非线性关系,变压器空载电流中必定包含丰富的高次谐波含量,空载电流 i_0 一般可分解为下式:

$$i_0 = \sqrt{2} A_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + \sqrt{2} A_2 \sin(\omega t + \Phi_2) + \sqrt{2} A_3 \sin(\omega t + \Phi_3) + \sqrt{2} A_4 \sin(\omega t + \Phi_4) + \sqrt{2} A_5 \sin(\omega t + \Phi_5) + \dots$$

由此可见,空载电流 i_0 中不仅有奇次谐波含量,还有一定的偶次谐波含量,测量变压器空载电流谐波就是通过某种方法来确定上式中 $A_1、A_2、A_3、A_4、A_5 \dots\dots$ 和 $\Phi_1、\Phi_2、\Phi_3、\Phi_4、\Phi_5 \dots\dots$ 的值。

目前,在变压器空载电流谐波测量方面最常用的仪器是电力谐波分析仪,其工作原理一般是通过模数转换(A/D)采集空载电流信号,然后通过傅立叶级数变换来求取各次谐波的幅值和相角。最后确定各次谐波含有率和总谐波畸变率。

和所有计量器具一样,电力谐波分析仪也有准确度方面的要求,具体要求见表 19-1。

表 19-1 中 U_r 为标称电压; I_r 为标称电流; U_h 为谐波电压; I_h 为谐波电流。A 等级仪器用于较精确的测量;B 等级仪器用于一般测量。空载电流谐波的测量一般采用 A 等级仪器测量。测量谐波次数一般为 2 次~19 次。

目前,国内变压器制造行业最常用的空载电流谐波测量仪器有以下几种:

DXC-1 型电力谐波测量仪;GXF-2 型电力谐波分析仪;HWA-1 型谐波分析仪。

第四节 空载电流谐波测量实例

目前,变压器空载电流谐波测量均采用电力谐波分析仪,而电力谐波分析仪是针对电力系统的谐波测量研制的,其标称输入电流一般较大,电流输入范围一般在 2.5A~10A 之间,而变压器的发展方向是低损耗,国内一些中小型变压器型号已升至 11 型,空载损耗和空载电流大幅降低,一些较小容量的变压器产品的空载励磁电流已远小于电力谐波分析仪最小标称电流 2.5A,而其中的高次谐波电流将更小,这种情况下根据谐波分析仪的允许误差来分析,谐波测量结果将会产生非常可观的误差,甚至严重偏离实际值。为保证测量结果的准确性,应使进入谐波分析仪的电流达到或接近其标称值。另外,所用电流互感器的频率响应特性也会使测量结果有一定的误差。但是由于一般要求所测谐波次数为 2 次~19 次,测量最高频率在 1 000Hz 以下,这种情况下可以忽略电流互感器的影响。再者,进行变压器空载电流谐波测量时,应同时测量电源电压谐波含量,因为电源电压谐波将对变压器空载电流谐波产生直接影响。电源电压总谐波畸变率不应超过 5%。

表 19-2、表 19-3 数据为两台不同规格电力变压器的空载电流谐波测量结果。

表 19-2 SFZ9-31 500/110 产品空载电流谐波

谐波 次数	A 相				B 相				C 相			
	电压/%	相角/°	电流/A	相角/°	电压/%	相角/°	电流/A	相角/°	电压/%	相角/°	电流/A	相角/°
1	100	356.5	1.469 3	319.8	100	116.3	1.572 6	52.0	100	235.6	2.152 8	184.5
2	0.046 3	76.7	0.005	199.6	0.052 4	15.6	0.005 6	66.0	0.016 9	162.9	0.003 9	298.6
3	1.823 8	278.5	0.403 1	10.4	1.575 2	101.4	0.318 1	204.4	0.666 3	50.4	0.135	155.6
4	0.035 5	62.5	0.002	139.3	0.039 6	171.5	0.003 5	290.1	0.034 1	359.0	0.002	92.5
5	3.394 2	338.4	0.508 1	78.1	3.687 7	237.0	0.564 2	331.9	4.733 6	109.1	0.687	205.3
6	0.024 2	323.8	0.003 1	67.5	0.023 3	78.6	0.000 3	21.1	0.039 3	110.6	0.002 9	230.4
7	3.232 9	339.4	0.282 5	71.4	3.070 2	92.5	0.267 7	184.0	3.670 6	209.6	0.324 6	301.6

续表

谐波 次数	A 相				B 相				C 相				
	电压/%	相角/°	电流/A	相角/°	电压/%	相角/°	电流/A	相角/°	电压/%	相角/°	电流/A	相角/°	
8	0.023 7	313.6	0.001 2	71.4	0.012 7	315.0	0.001 3	198.1	0.021 5	186.0	0.001 2	321.5	
9	0.498 5	294.0	0.041 5	29.1	0.548 9	132.2	0.041 7	228.3	0.231 1	40.7	0.018 1	140.9	
10	0.006 1	89.0	0.000 9	172.5	0.026 1	195.6	0.000 3	55.1	0.013 3	227.8	0.000 8	302.6	
11	0.417 7	128.5	0.025 4	201.6	0.848 5	338.4	0.055 1	61.4	0.522 2	183.5	0.040 3	266.0	
12	0.009 2	57.9	0.000 5	154.2	0.029 9	70.9	0.000 1	256.1	0.003 6	127.5	0.000 3	331.4	
13	0.396 8	44.1	0.026 3	122.6	0.214 7	196.6	0.012 7	245.1	0.246 4	226.4	0.023 6	320.4	
14	0.005 3	356.8	0.000 4	57.9	0.020 4	319.8	0.000 2	196.1	0.013 2	147.4	0.000 2	226.8	
15	0.253 5	283.9	0.012 8	21.1	0.342 3	108.1	0.015 3	206.3	0.075 7	6.0	0.003 6	100.4	
16	0.005 1	9.0	0.000 1	166.1	0.022 4	172.5	0.000 1	57.4	0.013 3	261.5	0.000 1	226.4	
17	0.861 1	135.5	0.034 2	224.1	0.779 7	350.5	0.031 8	76.1	0.519 2	257.2	0.018 6	340.4	
18	0.009 6	310.7	0.000 1	133.2	0.027 3	60.4	0.000	290.6	0.007 8	3.5	0.000 1	288.1	
19	0.140 2	334.2	0.006 9	56.0	0.106 8	182.5	0.001 6	245.6	0.098 5	101.9	0.006	218.0	
20	0.008	267.5	0.000 1	41.7	0.022	300.1	0.000 1	116.3	0.012 4	101.9	0.000 1	39.1	
21	0.192 4	140.4	0.006 9	243.0	0.259 6	350.1	0.009 1	82.0	0.008 2	236.0	0.003 1	334.7	
22	0.004 6	253.9	0.000 2	321.5	0.023 6	169.6	0.000 2	147.4	0.004 8	9.5	0.000 2	156.5	
THDu=5.1717%			THDi=48.369%		THDu=5.233 3%		THDi=44.855%		THDu=6.083 4%		THDi=35.938%		
f=49.943Hz					f=49.951Hz					f=49.963Hz			

表 19-3 S11-1 000/10 产品空载电流谐波

谐波次数	A 相, THD=22.076%			B 相, THD=24.687%			C 相, THD=15.727%		
	I_r/A	$(I_r/I_1)/\%$	相角/°	I_r/A	$(I_r/I_1)/\%$	相角/°	I_r/A	$(I_r/I_1)/\%$	相角/°
1	0.711	100	139.3	0.516	100	246.0	0.745 8	100	1.0
2	0.003 1	0.449 8	69.4	0.003 7	0.718 3	32.6	0.005 8	0.778	211.6
3	0.094 1	13.244	84.0	0.092 1	17.861	292.1	0.043 6	5.851	181.5
4	0.001 5	0.215 1	77.2	0.003	0.581 4	120.6	0.003 1	0.428 3	313.6
5	0.117 7	16.553	73.4	0.080 5	15.613	313.6	0.101 4	13.597	209.1
6	0.000 6	0.087 5	86.5	0.001 2	0.233 5	122.1	0.001 6	0.215 7	58.4
7	0.042 9	6.038 8	59.9	0.032 6	6.318 9	175.0	0.038 1	5.121 2	290.6
8	0.001 1	0.162 2	187.5	0.001 2	0.236 9	48.3	0.000 6	0.081 1	122.1
9	0.002 8	0.394 2	304.9	0.008 8	1.708 0	128.5	0.006	0.806 0	4.5
10	0.000 5	0.078 6	357.0	0.001 1	0.226 2	66.5	0.000 1	0.022 6	273.5
11	0.005 1	0.719 7	306.2	0.005 1	1.004 6	60.9	0.004 7	0.637 5	149.4
12	0.001 3	0.186 9	91.0	0.000 6	0.133 6	69.9	0.000 1	0.0151	274.5
13	0.003 8	0.547 1	303.0	0.0053	1.0286	55.6	0.002 2	0.305 2	157.0
14	0.000 9	0.127 2	182.5	0.000 3	0.073 0	61.4	0.000 1	0.020 2	354.5
15	0.001 0	0.148 2	343.9	0.002 8	0.544 5	47.8	0.000 8	0.110 2	141.5
16	0.000 4	0.057 7	344.4	0.000 1	0.020 1	70.9	0.000	0.008 3	346.7
17	0.001 3	0.190 2	276.5	0.002 5	0.502 8	67.9	0.000 6	0.080 8	301.6
18	0.000 8	0.116 7	89.3	0.000 1	0.035 6	236.0	0.000	0.011 6	334.2
19	0.001 7	0.249 0	307.5	0.001 9	0.384 6	57.0	0.000 3	0.048 5	256.1

注: $f=50.010\text{Hz}$ 。

第二十章 无线电干扰测量

第一节 概 述

高压线路和变电站高压设备及附件(如变压器、互感器、高压开关、绝缘子和吊挂金具等),其裸露在空气中的带电端部易产生电晕。电晕产生的高频辐射和传导电磁波,对周围的无线电通讯设备极易产生干扰;同时,长年电晕产生的能量损耗,使电力系统增加了不少经济损失。

为了降低电晕水平,对高压设备端部的尖角部位应进行改善或加以屏蔽。为了保证通讯质量和减少能量损耗,应对高压设备进行无线电干扰测量,并根据测量结果来改善设备的表面状况。

在无线电干扰强度(电晕强度)定量测量之前,多用目测法来确定电晕的起始电压。因目测法有一定的随机性,故用多次测量的结果取其平均值,作为电晕的起始电压。

关于无线电干扰定量的测量,早在 20 世纪 70 年代国际电工委员会无线电干扰特别委员(C.I.S.P.R)就制定了《来自架空电力线路和高压设备的干扰细则》(C.I.S.P.R 实验室测量)的规定,作为国际电工委员会(IEC)标准公布于世。

我国仿照该标准制定了 GB11604—1989《高压电气设备无线电干扰测试方法》标准,其内容与国际电工委员会标准基本相同。

第二节 试验条件

1 试验区域

试验最好在足够大屏蔽室内进行,以避免外部干扰和墙壁(通常接地)对试品表面电场产生任何显著的影响。

如果没有屏蔽室,也可在背景噪声水平比试品所规定的干扰水平低 10dB 的场地试验。

2 被试品的状态

通常试验室仅对于状态和干净被试品进行测量。试验前,应清除试品表面有影响的灰尘和纤维。

有特殊要求时,也可在潮湿、污秽、淋雨条件下进行试验。被试品所配有的全部正规附件应安装齐全,要尽可能符合运行时的实际情况。

3 试验条件

正常情况下,试验应在下述条件下进行:

- (1)温度:15℃~35℃;
- (2)气压:37kPa~107kPa;
- (3)相对湿度(干状态试验):45%~75%。

试验时,试区的气象条件和试品的气象条件应达到热平衡,并防止试品表面结露。测试得到的所有数据均不作气象条件修正。

4 测量频率

推荐的测量频率为 $0.5\text{MHz}\pm 0.05\text{MHz}$ 。也允许采用 0.5MHz~2MHz 之间的某一频率进行试验。实际上经常采用 1MHz 的频率进行试验。

第三节 测试回路

1 测试回路(见图 20-1)中各元件和相应技术说明

(1)试验变压器 T: 试验变压器应提供接近正弦波的试验电压, 正负半波应对称, 峰值与均方根值之比应满足 $\sqrt{2} \pm 0.07$ 的关系, 并不带有影响测量的高频载波。

(2)阻波器 L_1 、 C_1 : 在测量频率上呈现高阻抗, 对 300 Ω 负载至少能提供 35dB 的衰减。一般阻波器的阻抗在测量频率

下为 20 000 Ω 是足够的。试验中, 阻波器应尽可能接近耦合电容器 C_2 的顶部, 并使用信号发生器将阻波器调谐到测量频率上, 使 L_1 、 C_1 并联谐振得到高阻抗。将信号发生器并接到试验变压器 T 的高压端对地之间, 调节阻波器的可变电容器 C_1 , 在测量频率下使干扰测量仪上得到最小读数。阻波器的衰减值, 也可由接入或短接阻波器, 在测量仪上得到两次读数, 其差值即为阻波器的衰减值。通常电感 L_1 约为 200 μ H, 电容器 C_1 是可调的, 最大值约为 600pF。

阻波器的作用为减少从高压电源来的传导干扰以及防止试品产生的测量信号进入电源。

实际上, 要使 L_1 、 C_1 安装可靠, 在高电压下又不会产生电晕是很困难的, 而且造价很高, 一般实验室是难以做到的。若在试验中利用试验变压器的保护电阻来代替阻波器 L_1 、 C_1 的作用, 实践证明其效果良好。

(3)耦合电容器 C_2 : C_2 在试验时要能承受最高试验电压, 且自身不产生无线电干扰(电晕)。单独使用 C_2 时, 其电容应比被试品电容 C_x 至少大 5 倍。

也可由一个电容器 C_2 和一个电感 L_2 在测量频率下组成串联谐振回路, 其阻抗为 Z_0 。

上述两种情况, 都应保证 Z_0 或单独的 C_2 与 300 Ω 电阻串联之后, 其总阻抗为 300 $\Omega \pm 40\Omega$, 移相角不超过 20°。

(4)匹配电阻 R_1 : 为了消除测量回路内的反射, R_1 应等于测量电缆的波阻抗或测量仪器 M 的输入阻抗 R_m 。

(5)串联电阻 R_2 : 为了满足被试品 C_x 的无线电干扰负载为 300 Ω (等于架空线路的波阻抗)的要求, 测量仪器 M 的输入阻抗 R_m 与匹配电阻 R_1 并联之后, 必须串联一个电阻 R_2 , R_2 应满足 $\frac{R_1}{2} + R_2 = 300\Omega$ 的要求。

(6)低频滤波器 L_3 : 对工频电流提供一个低阻抗的通路。电感线圈应能满足通过工频电流的要求, 一般 L_3 取 1mH 左右即可。

(7)保护间隙 G: 并联于 L_3 两端, 可采用充气型保护间隙, 其工频击穿电压不应大于 400V。

(8)测量仪器 M: 测量仪器 M 通常为外差式接收机, 具有准峰值检波的高频电压表。测量仪器 M 应符合下列技术要求: 放大器 6dB 带宽 9kHz; 放电时间常数 160ms; 充电时间常数 1ms; 仪器机械时间常数 160ms。

(9)被试品 C_x : 被试品 C_x 的状态应满足第 2 节的要求。

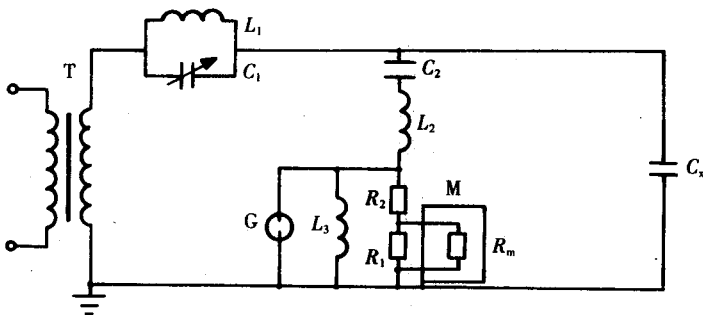


图 20-1 测试回路

2 测试回路的校正方法

当测试回路连接完毕之后,应对测试回路进行校正,以求出测试回路的各种衰减系数(分贝数)。当更换不同类型的试品时,应重新进行校正。试品 C_x 的 300Ω 无线电干扰负载的两端无线电干扰压降 B 以分贝数表示(压降 $1\mu\text{V}$ 为 0dB)。

$$B=20\times\log u \quad (20-1)$$

式中 B ——无线电干扰压降, dB ;

u ——无线电干扰压降, μV 。

(1)测试回路背景噪声:测试回路背景噪声应符合被试品的无线电干扰试验专业标准的要求,一般至少比被试品的最低干扰水平低 6dB 。

(2)在被试品不带电的情况下,使用高内阻(内阻至少为 $10\text{k}\Omega$,可使用外接电阻的方法获得高内阻)的正弦波高频信号发生器,并联到被试品两端。高频信号发生器调到测量频率上,送出一个高于背景噪声 20dB 的信号(一般为 1V 左右),进行高压校正,此时记下测量仪器的仪表读数为 B_1 (dB)。其校正回路如图 20-2 所示。

(3)保持高频信号发生器输出电平不变,按图 20-3 进行校正,记下测量仪器仪表的读数 B_2 (dB)。

(4)回路(线路)衰减系数 B_c , (2)、(3)两次仪表读数之差即为回路(线路)衰减系数 B_c , $B_c=B_2-B_1$ 。

(5)电阻回路衰减系数 B_r , 测量是以被试品的 300Ω 负载上的干扰电平(dB)表示的。 300Ω 电阻由 R_1 、 R_2 和 R_m 组成,即 $1/2R_1+R_2=300\Omega$ 。测量仪器所指示电平 B_m (dB)与输入端电阻 R_1 成正比。则电阻回路衰减系数 B_r 可由下式求出:

$$B_r=20\times\log\frac{300}{R_1/2} \quad (20-2)$$

当 $R_1=R_m=50\Omega$ 时,则 $B_r=2\text{dB}$;

当 $R_1=R_m=75\Omega$ 时,则 $B_r=18\text{dB}$

(注: 50Ω 、 75Ω 为相应测量电缆的波阻抗)

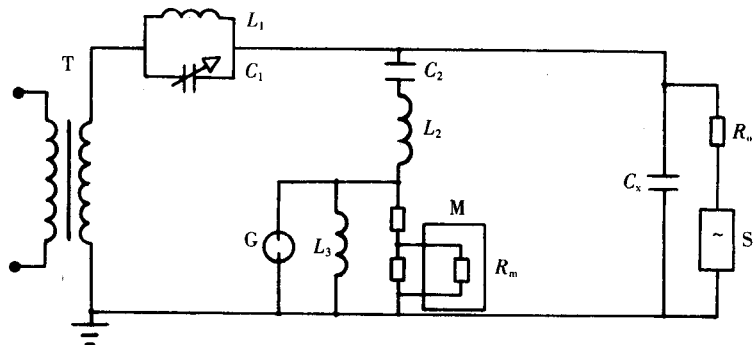


图 20-2 求 B_1 的校正回路

S—正弦波高频信号发生器 R_o —S 的外接高内阻, $R_o\geq 10\text{k}\Omega$

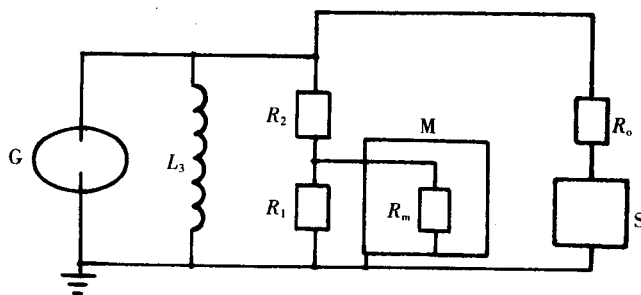


图 20-3 求 B_2 的校正回路

第四节 试验方法

测量回路校正完毕之后,取下高频信号发生器,并将测量回路恢复到测试状态,以备施加电压。

1 测量结果的计算方法

试品在规定的试验电压下,所测出的被试品无线电干扰电平 $B(\text{dB})$ 应由这时测量仪器的仪表读数 B_m 再加上回路衰减系数 B_c 和电阻回路衰减系数 B_r 而得到,即 $B=B_m+B_c+B_r(\text{dB})$ (有的产品标准规定 B 不大于 $2500\mu\text{V}$,即相当于 68dB)。

2 试验电压

试品的试验电压,应按试品的专业标准规定施加,一般试验电压不应低于 1.1 倍的设备最高运行电压。施加电压于试品的相对相之间时(如断路器)应与运行时的相间电压(线电压)一致。施加电压于试品的相对地之间时(如互感器)应与运行时的相对地电压(相电压)一致。

3 加压方式

被试品所产生的无线电干扰电平,并不完全由试验电压的瞬时值来确定,常常产生一种滞后效应。其现象为:在一定的试验电压水平下,无线电干扰可发生或不发生,这取决于这一试验电压水平是用减少还是增大数值来达到的。在高于或等于测量水平下施加电压的持续时间也会有一定影响。因此,对试品的加压程序应有非常明确的规定。

根据有关标准规定,建议按下列程序进行:

对试品施加比规定的试验电压高 10% 的电压,并维持至少 5min,然后缓慢下降到 30% 的试验电压,然后缓慢上升到原始值,并停留 1min,再按每级约 10% 的试验电压逐级下降到 30% 的试验电压,每级电压都进行无线电干扰电平测量。无线电干扰电平与施加电压画成的曲线,即为试品的无线电干扰特性曲线。

如果同类试品的无线电干扰电平有显著差别时,应对各个试品逐个试验。对该类试品的无线电干扰测量数据,可采用统计方法处理。

4 有关的观测

对无线电干扰测量增加额外的试验是有益的,以便测定出试品上的无线电干扰发生源(电晕)的位置和原因。在施加电压进行测量的同时,用目测法对试品进行观察。此时试验室遮黑(或在夜间)用目测或双目望远镜观察,根据电晕源产生的亮度确定极小的电晕源的位置。也可用曝光时间长的照相机或镜像放大器来证实这些观察。如果试验室不可能获得足够的暗度,可用听觉在一定程度上确定出电晕发生的位置。当然,用超声波探测器(其方向性很强)就更好。

第五节 试验报告

除了试品的技术条件外,试验报告还应包含如下内容:

1 试品状况

- (1)新的或是已用过的;
- (2)干净的或污染的(污染的性质和程度);
- (3)干燥的或潮湿的。

2 气象条件

- (1)温度;
- (2)气压;
- (3)相对湿度;
- (4)有无淋雨(标准的人工雨)。

3 试验回路情况

- (1)试验回路的布置;

(2)背景噪声水平。

4 试验电压和加压程序

(1)规定的试验电压；

(2)加压的试验程序。

5 测量的结果

(1)测量和计算的无线电干扰电平,用分贝或微伏表示；

(2)用目测或其他方法探测到的无线电干扰源(电晕)的位置；

(3)测量和计算的无线电干扰电平与所要求的限制电平之间的比较。

第二十一章 电力变压器冲击测量及绕组传递过电压试验

第一节 概 述

变压器在运行过程中要承受各种电压的考验,如持续工频电压、暂时过电压(包括工频电压升高和谐波过电压)、操作过电压和外部过电压(即雷电过电压)等。在这些电压作用下,变压器上的电位、电位差及梯度是确定变压器内部绝缘的关键条件。

在工频电压作用下,变压器绕组各点对地电位为线性分布,各匝间梯度相等,所以工频电压下的电位和梯度只要按匝数关系计算即可。在冲击电压作用下,由于冲击电压频率很高,且频率变化范围很大,绕组的电感电容参数在冲击电压作用过程中会产生自由振荡,因此绕组的局部会产生很高的对地电位和梯度。绕组各点的电位和梯度是时间和空间的函数,随着绝缘结构的变化,绕组的电感电容参数也在变化,绕组的最大电位及梯度变化过程也不一样,这就是绕组的冲击特性。绕组在冲击电压作用下的最大电位、绕组间电位差、匝间梯度及段间梯度又是决定变压器主、纵绝缘结构的必要条件,因而,研究变压器绕组冲击特性是变压器结构研究的主要内容,冲击测量又是研究变压器绕组冲击特性的重要方法。

20 世纪 70 年代以前冲击测量是研究变压器绕组的主要方法。那就是对多个变压器绝缘模型进行冲击测量,比较他们的冲击特性,选出合适的绝缘结构进行产品试制,再投产。比如,截波波形对低压感应电位的影响,多段纠结、内屏蔽结构及纠结—内屏—连续等多种绝缘结构组合等绕组结构的冲击特性,都是用冲击测量方法研究的。20 世纪 70 年代末 80 年代初,计算机应用于变压器绕组波过程的研究,这样,就可用计算机对不同结构绕组的波过程进行计算,选出最佳方案,作模型进行冲击测量,再对不足的地方进行修改。这样就大大地缩短了新结构的研究过程,节省了人力、物力和财力。这时的冲击测量作为一种验证性试验也是必不可少的。对于老产品或有问题的产品进行冲击特性分析,也是一种现场诊断方法之一。

第二节 冲击测量与冲击试验的差异

变压器冲击测量的原理,就是将冲击试验的高电压单次冲击波模拟成低电压下的重复性冲击波,以便于研究变压器绕组内部的冲击特性。其试验方法与冲击试验基本一样,有一个冲击波发生器和测量系统。所不同的是冲击试验用的冲击波发生器是产生几十万甚至上百万伏冲击电压的大设备,而冲击测量用的是产生 400V 左右冲击电压的波发生器。冲击试验用的测量系统由高压分压器、高压引线、测量电缆和示波器组成;冲击测量的测量系统因电压低只需要测量线和示波器就行了。第二方面不同的是冲击试验测量系统测量的是冲击电压幅值和波形参数及故障探测波形,而冲击测量的内容要丰富得多,如入波波形、入波绕组的最大电位及梯度、绕组间电位差、感应电位等等。

第三节 冲击测量的仪器

冲击测量用的仪器是波发生器和示波器。

波发生器用来产生施加于试品上的各种波形,如冲击全波、截波。若要测绕组起始分布和入口

电容则还需要产生方波。

波发生器输出波形幅值一般为 400V 左右,并连续可调。为测量时便于读数,输出波形为重复频率。仪器原理如图 21-1 所示。

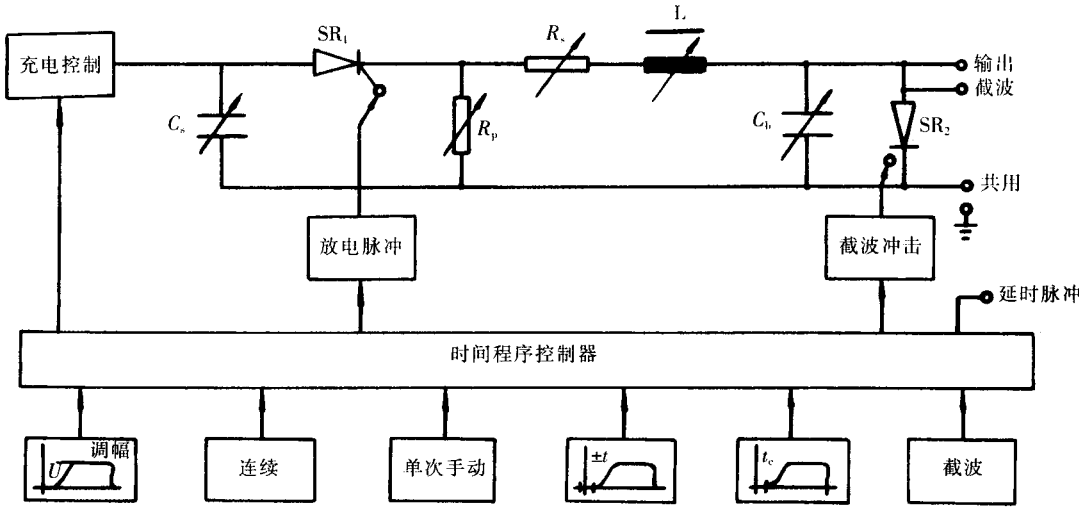


图 21-1 仪器原理方框图

C_s —充电电容 R_s —波前电阻 R_p —波尾电阻 C_b —负荷电容(也可外接) L —系统电感

这些参数均可在一定范围内任意调节,从而可得到所需的标准波形。

仪器内有一个直流稳压源,给 C_s 提供一个稳定的充电电源,其幅值 0V~500V 连续可调整。放电时间是由时间控制器输出给可控硅一个触发信号(触发脉冲),使放电回路得到一个冲击波形。脉冲的频率由时间控制器控制。控制器频率是由工频电源分频后产生的,所以频率稳定,便于通用示波器测试。冲击截波是通过可控硅来完成,由时间控制器输出控制信号。

仪器内部还可以输出一个供示波器触发用的延时脉冲,延时脉冲的时延可在一定范围内调节。

波形的调节是通过仪器面板按钮开关和波段开关转换而得。

波形输出在仪器的后面板上。图 21-2 为 RE-9901 型重复脉冲发生器的面板布局图。

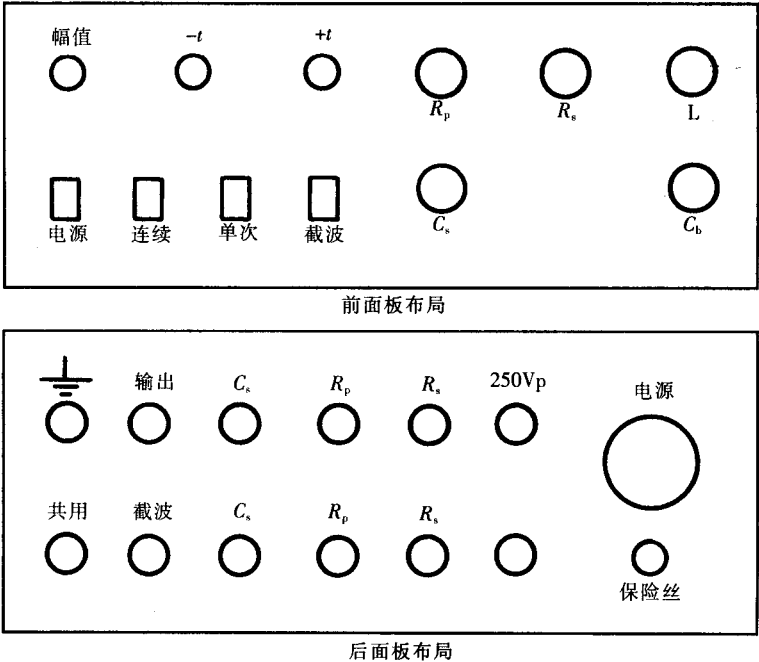


图 21-2 RE-9901 型波发生器面板布局图

对波发生器输出波形参数的要求,详见国标 GB311.1—1997《高电压输变电设备的绝缘配合》中图(1)(略)各类作用电压的典型波形。波形调节范围应参照图中电压波形范围及国标 GB1094.3 的要求。

示波器可以是模拟示波器也可以是数字示波器。示波器用来测量入波和绕组的电位和梯度等波形的幅值和波形。数字示波器因为能直接读取电压幅值和波形参数而更受欢迎,也减少了人为读数误差。

1 对模拟示波器的技术要求

(1)电压的峰值测量误差: $\leq 2\%$ 。

(2)线性度:垂直偏转线性度 $\leq 1\%$;

水平偏转线性度 $\leq 1\%$ 。

(3)传输特性

①示波器的方波响应满足下述要求:

上升时间: $t_r \leq \frac{1}{2f_{\max}}$, 且 $T_r \leq 0.03T_c$, T_c 为截波截断时间; f_{\max} 为可能出现在冲击试品上的最高振荡频率; 同时方波响应的衰减时间常数不小于 $100T_2$ 或单位方波响应的衰减在 $4T_2$ 时间内应不大于 0.04。 T_2 为预期测量的最大冲击波半峰值时间。

② 上限截止频率 f_2 应不小于 $2f_{\max}$, 下限截止频率应不大于 $\frac{0.005}{T_2}$ 。

(4)对模拟示波器的其他要求参见国标 GB813—89《冲击试验用示波器和峰值表》。

2 对数字示波器的要求

(1)总的不确定度:峰值测量 $\leq \pm 2.0\%$;

波形参数测量 $\leq \pm 4.0\%$ 。

(2)分项不确定度:采样率(采样数/s),大于等于 $30/T_s$, T_s 为被测时间间隔,如雷电冲击波的波前为 T_1 , T_s 为峰值达 30% 和 90% 处的时间间隔。为了测量波前振荡,采样率应高于 $8f_{\max}$ (f_{\max} 如模拟示波器技术要求中介绍)。

(3)额定分辨率应小于等于满量程的 0.4% (即 8bit)。

(4)读数准确度:读数方法所产生的不确定度应不大于所读参数值的 1%。

(5)记录长度:在采样率不变的情况下,能满足记录测量波形的全过程。

(6)关于数字示波器的其他要求参见国标 GB/T16896.1—1997《高电压冲击试验用数字记录仪,第一部分:对数字记录仪的要求》。

根据冲击测量梯度的需要,示波器必须具有两个通道,并要求两个通道的垂直放大系数一致,以减少测梯度及电位差时引起较大误差。

第四节 冲击测量内容

变压器冲击测量包括如下内容。

(1)最大电位:指被试绕组在冲击电压作用下,绕组各点出现的最大电位分布情况。当 $t=0$ 瞬间绕组各点的电位分布叫做起始分布。

(2)梯度:指绕组匝间、层间、饼间在同一瞬间的电位差。

(3)感应电位:感应电位指当被试绕组受到冲击波作用时,非试绕组上产生的感应过电压。

(4)电位差:指绕组绝缘对应点之间在同一瞬间的电位差。例如绕组之间电位差、相与相之间分

相间电位差、同一绕组不同点间电位差等。

(5)入口电容:当冲击波作用于变压器瞬间,由于电压波频率很高(ω 很大),绕组的等值电抗 ωL 很大,相当于 L 开路,而容抗 $\frac{1}{\omega C}$ 极小,从入波端看去,变压器相当于一个等值电容 C_i ,这个等值电容 C_i 就叫做变压器的入口电容。

第五节 冲击测量方法

1 测量接线

(1)仪器接线:测量电位的仪器接线如图 21-3,测梯度和电位差的仪器接线如图 21-4。

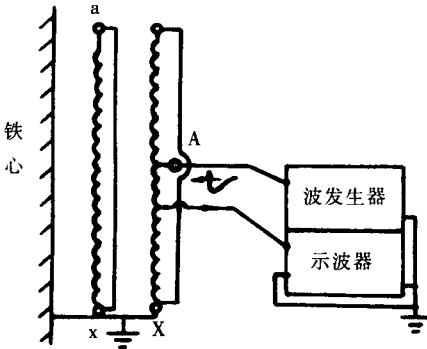


图 21-3 电位测量仪器接线

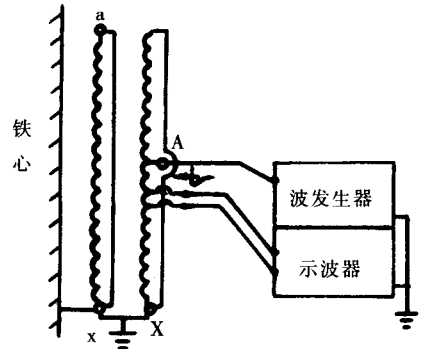


图 21-4 梯度和电位差测量仪器接线

(2)测量点的选择:变压器冲击测量点的选择应根据变压器绝缘结构的特点及绝缘弱点来选择,尤其是变压器产品,测量点应尽量少。

绕组最大电位及梯度测量的测量点一般选在绕组外表面。例如线段换位线附近,如图 21-5 中箭头 a、b 所示。梯度测量一般测绕组的外油道梯度,如图 21-5 中 a、b 之间,内油道梯度采用折算的办法。当然作为模型研究也可测内油道。

感应电位的测量点一般在非入波绕组的外表面,如高压绕组入波,测低压绕组的感应电位,则在高压绕组套装之前就在低压绕组所选取的测量部位埋好探针,并用多股铜线的塑胶线引出,如图 21-6 中 c、e 点所示。

绕组之间电位差的测量点,选择在两绕组结构对应点上。如图 21-6 中 c、d、e、f 点。

(3)入口电容测量接线:图 21-7 中外接电容 C_0 为已知电容(pF),测量入口电容施加波形必须是方

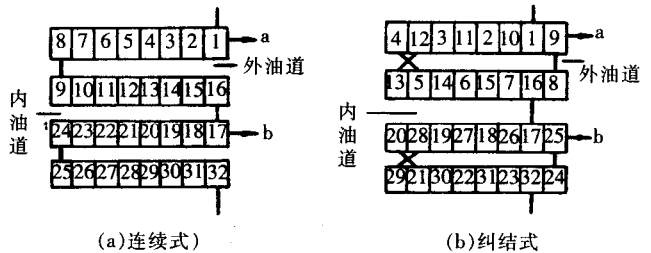


图 21-5 最大电位及梯度测量点示意图

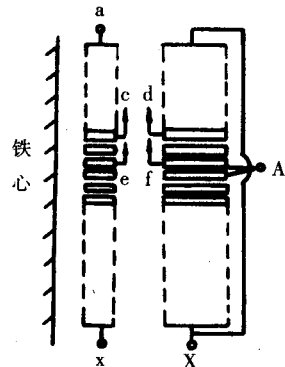


图 21-6 感应电位及电位差测量点示意图
c 与 d、e 与 f—绕组间电位差测量点
c、e—感应电位测量点

波,测量 A 点 U_1 和 X 点 U_2 在同一时刻的电位值,由 U_1 、 U_2 、 C_0 可推算出入口电容 C_i 的数值。

2 试品接线

冲击测量的试品接线与冲击试验一样,一般只测量一相。例如测 A 相,则从 A 相线端施加电压波,A 相中性点及其他各非试绕组首、末端均接地。

3 施加波形

冲击测量施加波形为冲击全波、截波,测起始分布和入口电容需要用方波。

冲击全波和截波形参数按 GB/T16927.1—

1997《高电压试验技术 第一部分 一般试验要求》及 GB1094.3—2003《电力变压器 第三部分 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙》标准规定,方波电压波形可参照 JB/T7586—1994《局部放电测试仪视在放电校准器》及 DL417—1991《电力设备局部放电现场测量导则》标准中规定,方波电压波形的上升时间 $t_r \leq 0.1\mu s$,衰减时间 t_d 在 $100\mu s \sim 1000\mu s$ 。

4 数据处理

冲击测量所测各种数据,如电位、梯度和电位差等,要读取波形的最大峰值(正或负),并记录其波形及相应时标。测量结果是用输入波峰值的百分数表示。

5 注意事项

(1)冲击测量线及测量点的引出线的长度对测量结果有一定的影响,引线太长能带来较大误差,对内屏蔽结构的绕组影响更为严重。若测量点较多,不同测量部位的引出线要分开引出,不要混在一起,以免相互干扰引起更大误差。

(2)用模拟示波器测梯度及电位差时,注意选择零位线,测量过程中零位线不要变动,以免由于两通道的放大系数不一样而带来误差。冲击测量过程中测量的波形幅值变化范围很大,为减少测量误差,要随时调整放大系数,将所测波形置于 50%~80%满屏范围内测量。

(3)绕组冲击特性测完后,若被测绕组是产品,则绕组绝缘的关键部位的测量点匝绝缘要进行包扎处理。

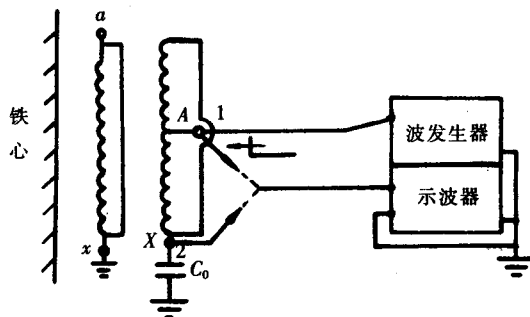


图 21-7 入口电容测量接线图

第六节 测量结果分析

绕组的最大电位、电位差及梯度决定了绕组的主、纵绝缘结构以及分接开关的主、纵绝缘。因此,冲击测量后,对绕组的绝缘性能要作分析,分析的方法有两种。

一种方法认为作用在绕组上的电压分为幅向电压(最大电位和电位差)及纵向电压(梯度),幅向电压决定了绕组的主绝缘,纵向电压决定了绕组的纵绝缘,不管是幅向电压还是纵向电压,只要作用电压小于最小击穿电压并有一定的裕度,就认为绝缘结构合理,否则就要对绝缘结构进行调整。

另一种方法是用许用场强来考核,将现场测量的梯度及相应的电位或电位差,计算出作用场强,只要作用场强小于许用场强,则绝缘结构的绝缘强度满足要求,否则就要调整现有的绝缘结构。

最小击穿电压和许用场强是将不同匝绝缘、不同油道及不同主绝缘的许多绝缘模型的试验数据进行数理统计分析计算而得到(在此不述)。

第七节 从高压绕组向低压绕组传递的过电压

GB1094.3—2003《电力变压器 第三部分 绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙》标准附录 B 中,介绍了从高压绕组向低压绕组传递的过电压包括冲击波瞬态过电压和工频过电压。传递的工频过电压是由绕组之间及各绕组对地之间的电容来确定的,这种电容可以准确地测出,GB1094.1—1996《电力变压器 第一部分 总则》中已将“绕组对地和绕组间的电容测定”和冲击波的“瞬态过电压传输特性测定”列为特殊试验项目。

瞬态传递过电压的测量方法,目前还没有标准规定的可操作的测量方法。有的企业用冲击测量的方法测量传递过电压。测量时的仪器接线与最大电位测量相同,测量点为低压线端。在低压线端必须并联负载。负载的选择依变压器实际运行情况而定,若低压绕组接开关、较短的电线或附加电容,负载则用电容 C_s 代替,低压端若接较长的电线或封闭母线,则负载用波阻抗 Z 代替。 C_s 和 Z 可由用户提出。

第八节 冲击测量实例

今以一台 SFPZ3-120000/220 变压器冲击测量为例。

1 绝缘结构

主绝缘,如图 21-8 所示。

纵绝缘:高压绕组为中部进线,每部分由 14 段插花纠和 26 段普通纠结线段组成。匝绝缘为 2.25mm。

每相调压绕组分上下两柱,每柱由两部分组成,上部为左绕向,下部为右绕向。每部分由两个四段纠结式共 8 段组成。匝绝缘 2.95mm。

低压绕组为连续式 96 段,匝绝缘 0.6mm。

2 测量接线

见图 21-9。以测量 A 相,分接位置以最大分接为例。

3 测量内容

(1)高压入波为全波、截波。在最大、额定、最小分接情况下测量高压绕组最大电位,低压绕组感

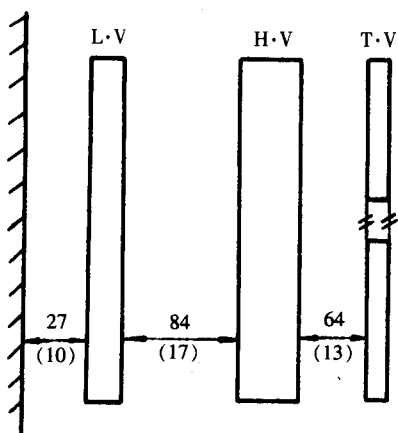


图 21-8 SFPZ3-120000/220 主绝缘

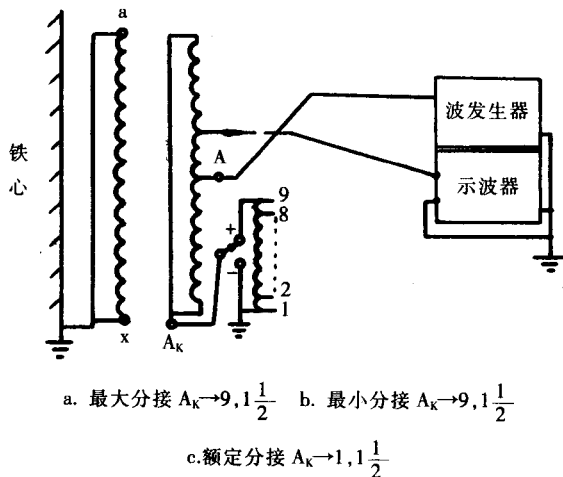


图 21-9 SFPZ3-120000/220 冲击测量接线图

应电位,调压绕组最大电位;高压绕组及调压分接间梯度;绕组间电位差;入口电容。

(2)高压中性点进波,重复以上内容。

(3)低压绕组入波,重复以上内容。

4 测量结果

因测量数据较多,只列出高压首端入波,最小分接情况下的部分数据。

(1)高压及调压绕组最大电位,见表 21-1、表 21-2、图 21-10。

(2)高压绕组外油道及调压绕组分接间梯度,见表 21-3、表 21-4、图 21-11。

表 21-1 高压绕组最大电位(%)

线段号	0	2 _侧	4 _侧	6 _侧	8 _侧	10 _侧	12 _侧	14 _侧	16 _侧	18 _侧	20 _侧	22 _侧	24 _侧	26 _侧	28 _侧	30 _侧	32 _侧	34 _侧	36 _侧	38 _侧	40
全波	100	97	89	82	76	71	68	62	59	55	51	48	46	43	42	40	37	34	29	24	26
截波	100	96	88	82	76	72	68	64	60	56	52	49	46	43	40	37	34	30	25	19	10

表 21-2 调压绕组最大电位(%)

分接号	1	2	3	4	5	6	8	9	9
全波	27	23	20	17	14	11	7	3	0
截波	10	8	7	6	5	4	3	3	0

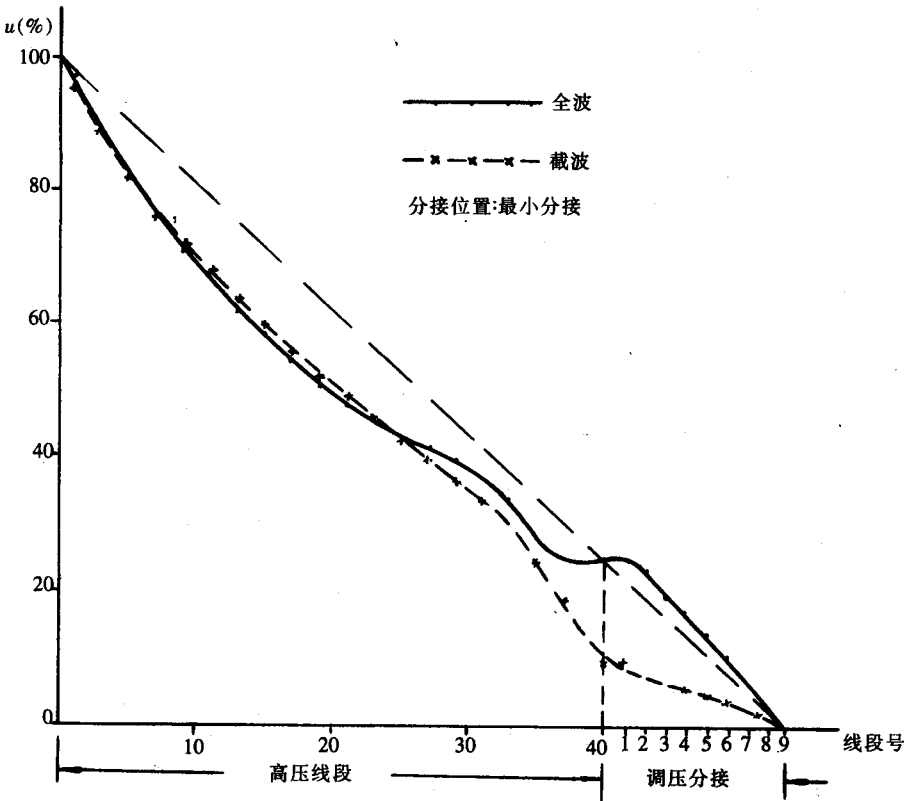


图 21-10 高压绕组及调压绕组最大电位分布曲线

表 21-3 高压绕组外油道梯度(%)

油道号	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	38 _侧 ~40 _注
全波	7.8	7.3	7.3	6.8	6.8	6.8	6.8	7.8	8.8	8.8	7.8	7.8	6.8	5.9	5.9	5.4	4.9	4.9	5.9	10.7
截波	6.8	7.3	6.4	5.9	4.4	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.4	2.9	2.9	2.9	2.9	3.9	3.9	5.4	5.9	9.8

表 21-4 调压分接间梯度(%)

调压分接	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
全波	3.2	2.7	3.2	2.7	3.2	3.2	3.2	3.2
截波	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.8	2.3

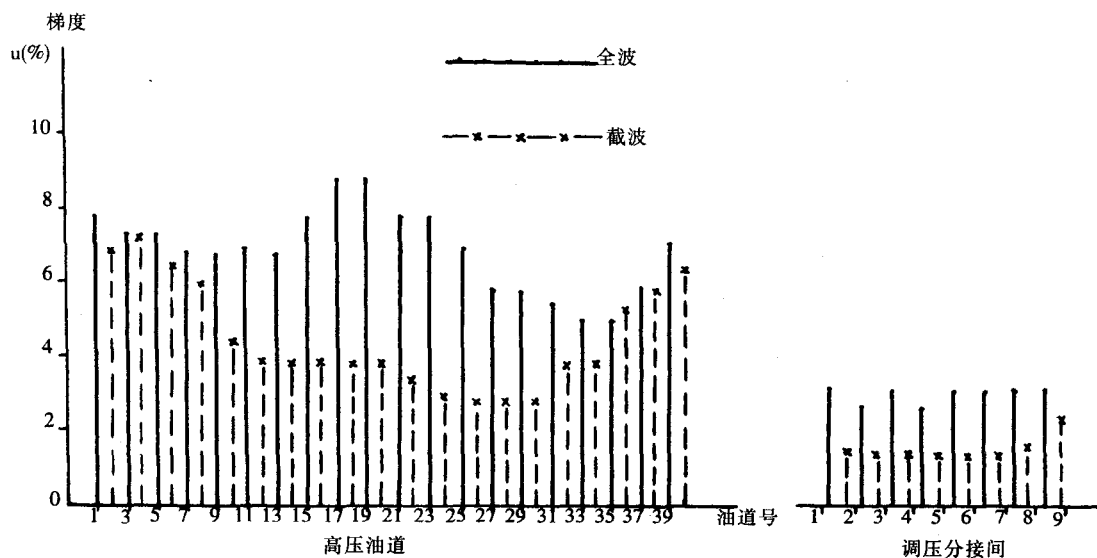


图 21-11 高压绕组外油道及调压分接间梯度

(3) 低压感应电位, 见表 21-5、图 21-12。

(4) 绕组间电位差, 见表 21-6、表 21-7、表 21-8。

表 21-5 低压感应电位(%)

线段号	0	2	4	6	8	10	12	14	22	24	26	46	48	50	70	72	74	92	94	96
全波	0	1	2	4	6	7	8	9	12	13	14	18	18	18	15	15	14	3	2	0
截波	0	1	5	6	11	12	14	15	21	22	23	30	30	30	21	21	20	4	2	0

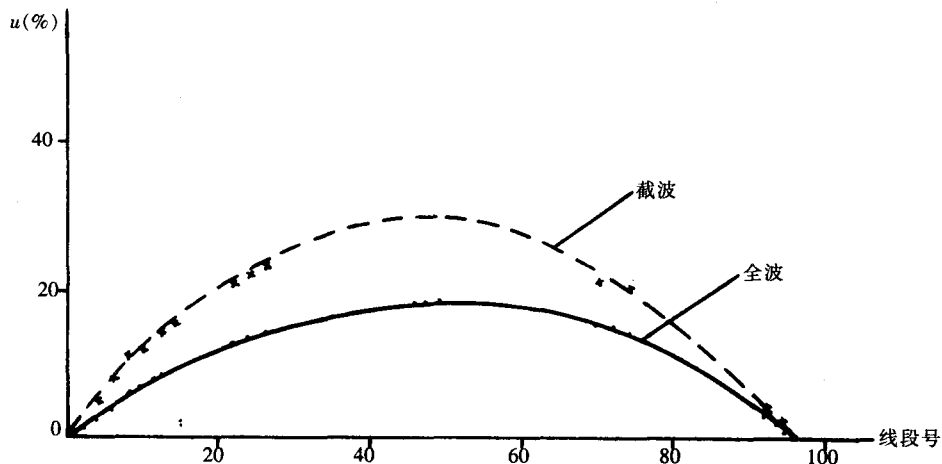


图 21-12 低压感应电位

表 21-6 高压对低压电位差 (%)

对应点	高 ₂ -低 ₄₈	高 ₁₀ -低 ₁₂	高 ₂₀ -低 ₄₀	高 ₂₀ -低 ₇₂
全波	114.6	72.9	56.3	51.6
截波	88.3	71.3	48.9	46.8

表 21-7 高压 A 端对调压分接间电位差 (%)

对应点	A-T ₁	A-T ₂	A-T ₃	A-T ₄	A-T ₅	A-T ₆	A-T ₇	A-T ₈	A-T ₉
全波	106.1	104	96.9	95.9	95.9	95.9	96.9	98	100
截波	91.5	92.6	93.6	94.6	95.7	96.8	97.9	98.9	100

表 21-8 调压分接相间电位差 (%)

分接位置	最小分接		额定分接		最大分接	
对应点	A ₁ -B ₁	A ₅ -B ₅	A ₅ -B ₅	A ₉ -B ₉	A ₅ -B ₅	A ₉ -B ₉
全波	28.1	14.6	9.6	18.1	6.3	12.5
截波	9.6	5.3	2.1	4.3	5.4	10.9

5 绝缘强度分析

(1) 低压感应电位截波为 30%，作用电压为 $1050 \times 0.30 = 315\text{kV}$ ，高于低压绕组自身 220kV 的绝缘水平，存在问题，要研究处理（交设计解决）。

(2) 高压对低压之间电位差全波为 106.1%，作用电压为 $950 \times 1.061 = 1008\text{kV}$ 。

(3) 高压绕组纵绝缘裕度校核。

高压绕组纵绝缘裕度在 1.34 以上，认为可以。见表 21-9。

表 21-9

油道号	1	2	3	4	17	18	备注
梯度/%	7.8/6.8	11.7/10.2	7.3/7.3	10.95/10.95	8.8/3.9	13.2/	(全波/截波)
油道距离/mm	8	14	8	12	6	8	
最小击穿电压/kV	168/219	216/270	168/219	201/254	149/201	168/	(全波/截波)
作用电压/kV	74.1/71.4	123/107.1	69.4/76.7	104/115	83.6/	125.4	
绝缘裕度		1.75/2.5		1.93/2.2	1.78/	1.34	

注：表中的 2、4、18 油道分别由 1、3、17 油道乘以 1.5 倍计算而得。

第二十二章 长期空载与油流带电试验

第一节 概 述

变压器油是变压器的重要组成部分,它既是隔离高电压的绝缘介质,又是冷却介质。高电压、大容量电力变压器除绝缘问题外,温升也是影响变压器运行寿命的突出问题。为了改善高电压、大容量变压器的温升性能,大多采用强迫油循环的冷却方式。随着变压器容量的增大,为了提高油的冷却效果,改善温升,加大油的循环速度是一种有效的方法,但是,加大油的流速带来的是快速流动的油使变压器本体产生静电及因静电的不断升高引起放电,即油流静电放电现象。

第二节 油流带电的机理及其危害

对于变压器油流带电的机理,至今尚未有一个完整、确切的理论,比较常见的解释是:固体材料,如绝缘纸板,其主要成分是纤维素和木质素,其中纤维素带有羟基($-\text{OH}$),木质素带有羟基、醛基($-\text{CHO}$)。在绝缘油的不断流动之下,油与绝缘纸板发生摩擦,使得这些基因发生电子云的偏移,纤维素和木质素分子就被 $-\text{H}^+$ 的正电性所覆盖,带正电的 $-\text{H}^+$ 对油中的负离子有较强的亲和力,进而吸附油中的负离子,在油—纸界面上形成偶电层。当变压器油以一定速度流动时,偶电层的电荷发生分离,负电荷仍然附着在纸板的表面,正电荷进入油中,并随油流动,这样,油就带正电而纸板带负电,随着油的循环流动,油中正电荷越聚越多,当积聚到一定程度就可能向绝缘纸板放电。

固—液界面区的电荷要进入油的内部,与油在电场的作用下的流体动力学有密切的关系,液体在流动时,由于流速的不同,存在着两个明显不同状态:层流和紊流。层流的流速较低,液体质点运动互不干扰,呈线性或层状,紊流的流速较高,质点流的大小和方向随时间而变化。对于强迫油循环冷却方式的变压器,油在变压器内部的流动状态一般为紊流。在电场作用下固—液界面处的电荷运动除沉积、扩散形成外,还有在电场作用下电荷的迁移,电荷能否从固—液界面区进入紊流中心并与油一起流动与电场作用下电荷的迁移能力有关。如果偶电层中的电荷进入油,随油在油道中流动,就会使油道内绝缘表面、绕组的进油口等处带有静电,严重时可发生放电。

油流带电的产生,可用图 22-1 简单描述,在流动的液体中,在两种不同物质的界面上,尤其是固—液界面上,亦会发生电荷的分离。如果固体—液体绝缘材料均具有良好的绝缘性能,电荷亦会

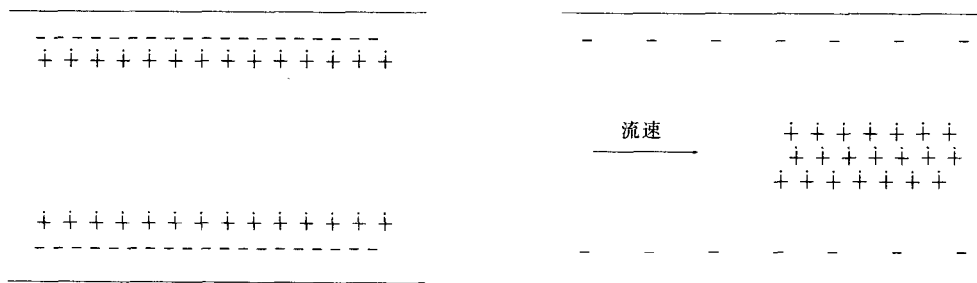


图 22-1 油流带电示意图

积累起来。

变压器油经过油泵加速后,传递到绕组内的冷却油道,在油和固体绝缘材料(如纸和纸板)的界面上就会产生静电电荷的分离。由于变压器油和绝缘纸板及绝缘纸都是良好的绝缘材料,因而很容易形成静电电荷的分离,通常,纸及纸板上积累的是负电荷,而流动的变压器油中积累的是正电荷,尽管有电荷对地泄漏和电荷的中和过程,但往往是产生的电荷总是多于泄漏和中和的电荷。当某处电荷积累比较密集时,其产生的场强也随之增大,这个场强超过一定程度时,就会在油中或固体绝缘表面上产生静电放电或爬电放电,当放电发展到比较严重时,固体绝缘受到损伤,随着损伤的不断加大,最终将导致变压器的严重事故。

油流带电引起的后果是很严重的。1983年12月12日,美国得克萨斯州动力与照明公司生产的一台345/138kV,450MVA的壳式变压器在电站运行中,由于油流静电放电引起油箱内发生闪络,闪络产生的巨大压力使分接开关附近的挡板断裂、溅出80m³的油,将该变压器运回制造厂解体后发现,在绕组上,绝缘件和油管上有很多放电痕迹,电痕化沿循环通道发展。同时,还有碳化的沉积。从20世纪80年代中期到20世纪90年代初,我国开始较多地生产500kV等级变压器,运行中一些变压器相继出现了问题,有的无法继续运行。如1989年辽阳1号主变C相、安徽淮南洛河电厂主变B相、山东潍坊主变B相运行事故,而这些变压器在投运后到事故发生前的各项常规电气指标均合格,变压器油中可燃性气体含量均在正常范围内,事故前无明显征兆,这表明变压器常规预防性试验判断对此已无能为力,造成这些事故的原因经调查分析后,认为变压器油流带电可能是其中的主要因素。1989年6月,通过对一台500kV变压器进行研究性试验,第一次发现了油流带电问题,当不加电压,仅开动油泵,发现内部有不规则断续的响声,同时,在高压套管测屏上,可发现有随着响声同步出现的较大单个宽幅($\geq 200\mu\text{s}$)的脉冲信号,经反复试验,现象一致,并经超声检测,得到同一结论,证实了变压器内部确实存在着油流带电引发的放电。

国内有关研究机构、变压器制造厂等陆续对油流带电产生原因、抑制办法及测试方法进行了大量的研究工作,取得了较大的进展,但目前由于对于该领域认识尚不充分,因而没有形成一套完整的用于分析变压器中油流带电的理论和计算手段,没有获得一套系统化、可以用于界定变压器静电特性的值得广泛推荐的测试方法和参数。目前的测试方法仍是属于研究性和经验性的。

第三节 油流静电电流的测试原理和常用的几种方法

由于变压器的油流静电可以分布在变压器各绝缘件上和油道中,而对于这些静电情况往往是无法测量的,目前所有的测量均是采用间接的方式。当变压器内部的油流静电引发放电时,这个放电信号则是有可能测量到的,但仍无法定量地判断其放电能量。因此无论是油流静电是否达到放电,其测量结果都是具有较大的局限性的。目前,对油流静电测量只能是测量变压器油流静电是否产生放电,如不产生放电,只能测量产生静电的大致程度。

变压器油流静电电流测量原理是:由于在油流的作用下,产生电荷分离,使变压器各绕组的绝缘纸及纸板积聚负电荷,而铁心、夹件、油管积聚正电荷。变压器绕组表面绝缘纸及纸板上积聚的负电荷,有一部分被绕组吸收,使绕组中存在多余的负电荷,而绕组中多余的负电荷的多少,通常认为是与其表面绝缘纸及纸板上积聚负的电荷量大致成正比。因此只要能够测量到绕组中对地的静电量,即可判断油流带电的大致趋向。同理,变压器铁心与夹件对地静电量也是可以测得的。

测量静电量,可以采用电压法和电流法,如高压绕组对地电容为 C ,则按电压法静电量应为:

$$Q = CU \quad (22-1)$$

式中 Q ——静电量, C ;

C ——被测绕组对地电容, F;
 U ——被测绕组对地静电电压, V。

或按电流法

$$Q = \int_0^T i(t) dt \quad (22-2)$$

式中 Q ——为 T 时刻的静电量, C;

$i(t)$ ——静电电流, A;

T ——时间。

1 电压法

测量线路见图 22-2。

对于电压法: C 为常数, 假设绕组对地的绝缘是良好的(一般如此), 理想情况为无泄漏。那么电压法和电流法应该是一致的, 但事实上, 泄漏总是存在的, 当产生的静电和泄漏的静电随着静电电压的不断上升, 最终将稳定到一个数值上, 曲线如图 22-3 所示。

由于通常变压器绕组绝缘是比较好的, 其电阻可达 $10^{10} \Omega$, 所以往往静电电压升了很高才能达到平衡和稳定, 这时所计算的静电量实际上已经泄漏了。另外, 高的静电电压很容易引发放电, 而这种放电属于人为的, 因此, 这种方法基本已不使用, 有时只用于一些研究性试验。用电压法测量静电时, 电压应采用静电电压表, 其内阻通常大于 $10^{12} \Omega$ 。

2 电流法

测量线路如图 22-4(以 Yd 联结组为例)所示。

试验时, 不加电压, 只开动油泵(按运行时开泵数), 此时测量各绕组及铁心对地的静电电流, 同时, 监测局放及超声信号。测量中, 局放信号与超声信号应使用同一台数字示波器, 并用电信号触发。若发生静电放电, 其电信号应当是一个较宽的单个脉冲, 并与声信号同时出现(声信号滞后于电信号)。超声探头(传感器)通常选用 2 个以上, 安放在不同位置。

在这个试验中, 静电电流的大小通常可以定性地反映出油流带电的趋势, 但目前尚无界定值。它与变压器的结构形式及变压器油的绝缘状态及温度、流速有关。在同一结构形式的变压器中, 变

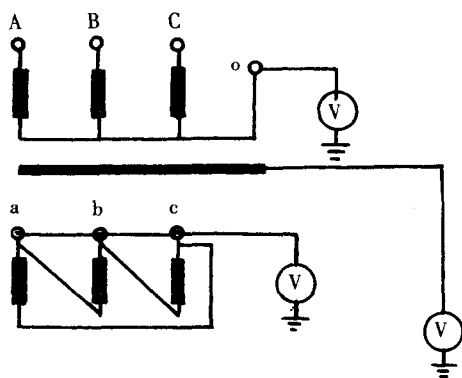


图 22-2 电压法测量线路图

V 为静电电压表

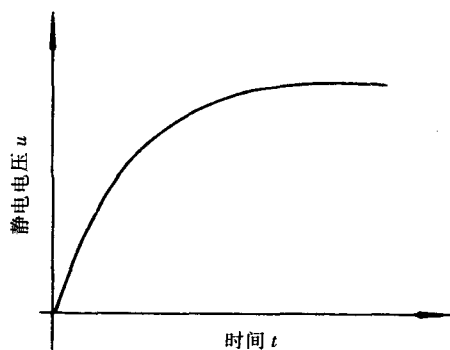


图 22-3 静电电压与时间关系

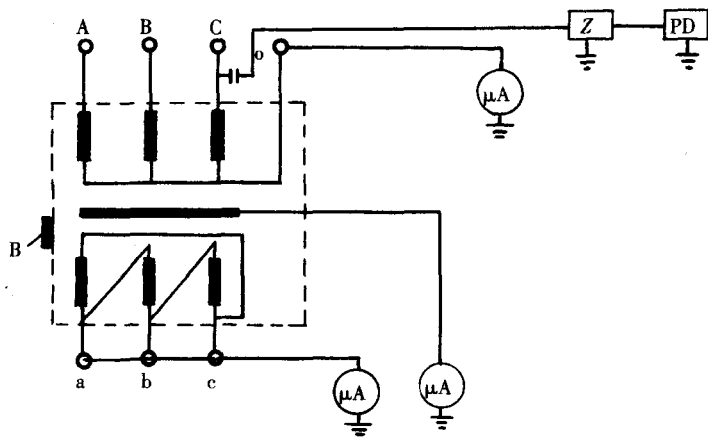


图 22-4 电流法测量线路图

μA —直流微安表 Z—局放接收阻抗 PD—局放仪

B—超声检测探头

变压器油的绝缘电阻越高,产生的分离电荷越多,则静电电流值相应大一些。试验中,应详细记录,通常隔半小时记录一次各电流值,如条件许可应连续记录,这样可以更准确地反映出绕组和铁心所释放出的分离电荷数量(如图 22-5,阴影部分为分离电荷量)。

在一般情况下,绕组对地的静电电流为负值,而铁心夹件对地电流为正值。但是,有时在试验中也可出现相反的静电趋势。这是因为影响变压器的油流静电的因素较多。在变压器内,除固体绝缘材料与油界面发生静电分离外,还有其他的静电分离源,如潜油泵叶片和变压器油之间的静电分离等。在变压器中存在各种因素的影响,测量出的结果是一个综合值,其数值大小和极性均有所变化。另外,绕组上积累的负电荷在向套管测量端子传输的过程中,在套管尾部均压球或穿管的软连线、铜排处存在同油中携带的正电荷发生中和。因此测量结果是发生电荷中和后的结果。

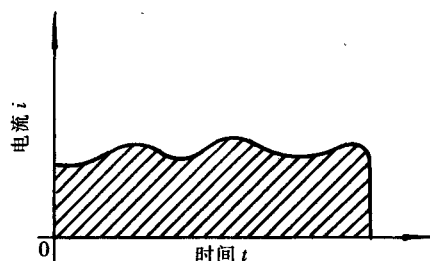


图 22-5 电流与时间的关系

3. 长时间空载试验时的油流静电电流测量

上面测量油流静电电流均是在变压器未加电压状态下的情况。变压器运行时,由于存在交变电场,在交变电场作用下,油流静电电流将会有所增强。通常认为交变电场可以增加油和绝缘纸板界面处电荷的分离,因而使油流静电电流增强,使绕组表面静电增加,这一点同试验结果是吻合的。在交变电场存在的情况下,测量变压器绕组及铁心、夹件对地静电电流,意义更为重要。GB/T16274—1996 规定,长时间空载试验的目的也是检查在油流状态下,并在 1.1 倍工作电压下,连续 12h,变压器内部是否有不正常放电,并通过长时间空载试验前后变压器油的色谱分析及试验中有无声电信号来进行判断。在长时间空载试验中同时测量绕组的静电电流是近年来国内外所采用的一种新方法,它使油流静电电流的测量更符合变压器的实际运行状态。沈阳某变压器制造厂从 1999 年开始采用这一方法,并同变压器不加电压的情况进行了对比试验,发现在 1.1 倍空载电压下的静电电流偏大 2%~30%。这一结果同理论分析是相吻合的,也证实了这一方法的可用性。这种方法的测量接线如图 22-6(以 Yd 联结组变压器为例)。

试验时,变压器高压套管端子及低压供电系统均不应产生可测到的电晕,一般要求供电系统干扰局放应 $\leq 50\text{pC}$,以免影响局放监测。超声传感器数量一般不少于 2 个,其安放位置一般选择认为是比较容易产生静电放电的位置。如高低压绕组的油道入口处,用于油流导向的成型绝缘角环处等。超声信号应采用电信号触发(同一台多通道数字记录仪)。

4 试验结果评价

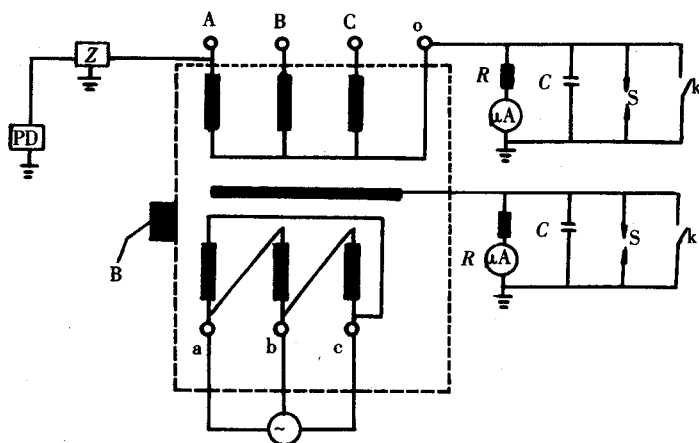


图 22-6 1.1 倍空载电压下测静电电流法

R—电阻 S—放电保护间隙 k—闸刀开关 μA —直流微安表
C—电容器(主要是给交流电流提供通路) B—超声检测探头传感器 Z—局放接收阻抗 D—局放检测仪

判断被试变压器通过该项试验应具备以下条件:

(1)在整个试验期间,产品局放量不超过合同要求,且无上升趋势,尤其是不出现较宽的电脉冲信号及相对应的声信号。

(2)在整个试验过程中,测量的静电电流应 $\leq 1\mu\text{A}$ (启动油泵瞬间不计,因目前通常采用的是机械式电流表,其阻尼很小,开泵瞬间会产生过冲),且在一定范围内较平稳波动,无上升趋势。如在规定的时间内,静电电流有上升的趋势,应延长试验时间,直至稳定或呈波浪式稳定。

(3)变压器油色谱在试验前后无明显变化,尤其是不应出现乙炔,氢气无明显增加。

试验中出现下列情况应引起高度重视:

(1)电信号与相对应的声信号同步出现(声信号滞后于电信号),如间断或重复出现的电信号为单个幅值较高(10^3pC 以上),脉冲较宽($\geq 200\mu\text{s}$),并有相对应的声信号,则可以考虑是由油流静电放电所致。当静电放电能量较大时,可以听到油箱内有同电信号同步的放电声。

(2)静电电流突然有较大摆动,此时应密切地注意是否有相应的电信号和声信号。此时有两种可能,一是存在静电放电,另一种可能是电荷的快速中和,而后者属正常现象。

(3)当油的色谱分析出现乙炔,则可以认定变压器内部存在电弧放电。尽管是极其微量的乙炔,由于变压器油流静电放电其能量通常都比较小,有时尽管确实存在静电放电,变压器油的色谱分析中乙炔尚不一定检出(特别是装油量较多的大容量变压器)。静电放电油中溶气的组分通常是: H_2 :75%以上、 CO :10%~15%、 CH_4 :5%~10%、 C_2H_4 :0~5%,可见油流静电放电的主要特征气体是氢气,因此应特别注意氢气的变化(当然,它和油中电晕放电的特征气体相近,有时也难以判别,但对于一台好的变压器,油中不应发生电晕放电)。

第四节 油流静电电流测量的典型数据

1 试品 1 型号:SFP-370000/500

该变压器在 12h 长时间空载试验时,同时测量高压绕组(中性点)静电电流,4h 测量期间,静电电流稳定,无异常声电信号,油色谱分析未发现乙炔,氢气无明显变化。试验通过。数据见表 22-1、表 22-2。

表 22-1 试品 1 空载试验时油流静电电流测量结果

时间 /h	电压 /kV	高压绕组局放 /pC	高压绕组(中性点) 静电电流/ μA	超声 信号	试品温度 /℃	时间 /h	电压 /kV	高压绕组局放 /pC	高压绕组(中性点) 静电电流/ μA	超声 信号	试品温度 /℃
0.0	350	40	-0.05	无	21	5.0	350	40	-0.04	无	21
0.5	350	40	-0.05	无	21	6.0	350	40	——	——	21
1.0	350	40	-0.05	无	21	7.0	350	40	——	——	21
1.5	350	40	-0.04	无	21	8.0	350	40	——	——	21
2.0	350	40	-0.04	无	21	9.0	350	40	——	——	21
2.5	350	40	-0.04	无	21	10.0	350	40	——	——	21
3.0	350	40	-0.04	无	21	11.0	350	40	——	——	21
3.5	350	40	-0.04	无	21	12.0	350	40	——	——	21
4.0	350	40	-0.04	无	21						

注:长时间空载试验 12h,其中油流静电测量 4h。试验时,开启正常运行时的全部油泵。表中负号表示静电电流是负极性的。

表 22-2 试品 1 色谱检测值

 $\mu\text{L/L}$

取样时间	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	H ₂
空载前	2.72	136.61	痕	痕	0	0	痕	3.21
空载 6h	3.83	150.39	痕	痕	0	0	痕	3.21
空载 12h	4.38	157.28	痕	痕	0	0	痕	3.22

2 试品 2 型号:OSFPSZ9-240000/330GY

该变压器在 12h 长时间空载试验时,同时测量高压绕组(中性点)静电电流,在第 5h 时,静电电流增大,延长试验时间后稳定,试验中,无异常声电信号,油色谱未发现乙炔,氢气无明显变化。试验通过。数据见表 22-3、表 22-4。

表 22-3 试品 2 空载试验时油流静电电流测量结果

时间 /h	电压 /kV	高压绕组局放 /pC	高压绕组(中性点) 静电电流/ μA	超声 信号	试品温度 /℃	时间 /h	电压 /kV	高压绕组局放 /pC	高压绕组(中性点) 静电电流/ μA	超声 信号	试品温度 /℃
0.0	230.5	75	-0.02	无	16	7.0	230.5	75	-0.06	无	17
1.0	230.5	75	-0.03	无	16	8.0	230.5	75	-0.06	无	17
2.0	230.5	75	-0.04	无	16	9.0	230.5	75	—	—	17
3.0	230.5	75	-0.04	无	16	10.0	230.5	75	—	—	17
4.0	230.5	75	-0.04	无	17	11.0	230.5	75	—	—	17
5.0	230.5	75	-0.14	无	17	12.0	230.5	75	—	—	17
6.0	230.5	75	-0.10	无	17						

注:开启正常运行时的全部油泵。表中负号表示静电电流是负极性的。

表 22-4 试品 2 色谱检测值

 $\mu\text{L/L}$

取样时间	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	H ₂
空载前	57.86	303.60	2.65	0	0	0	2.65	19.74
空载 6h	59.52	311.59	2.82	0	0	0	2.82	21.72
空载 12h	61.17	319.58	2.82	0	0	0	2.82	21.72

3 试品 3 型号:SFP-720000/500

表 22-5 是该变压器在长期空载试验后持续 4h 油流静电电流的测量结果(大气条件:大气压力 $P=101.5\text{kPa}$,相对湿度 $H=62\%$,环境温度 $T=14^\circ\text{C}$)。

表 22-6 是该变压器在 1.1 倍 $U_m/\sqrt{3}$ 电压下 12h 长期空载试验时油流静电电流的测量结果(大气条件:大气压力 $P=101.2\text{kPa}$, $H=60\%$,环境温度 $T=14^\circ\text{C}$)。

从表 22-5、表 22-6 数据看出,试品在未施加电压时,高压中性点对地静电电流值都为 $0.02\mu\text{A}$;长期空载试验时油流静电电流测量结果有所增加,增加了 $0.005\mu\text{A}$ 。

表 22-7 是在温升试验下该变压器油流静电电流的测量结果(大气条件:大气压力 $P=100.5\text{kPa}$,相对湿度 $H=61\%$,环境温度 $T=14^\circ\text{C}$)。

从表 22-7 可以看出,在温升试验中,随着温度的逐渐升高,铁心和夹件对地静电电流逐渐增

表 22-5 试品 3 长期空载试验后油流静电电流测量结果

时间/t	产品油温/℃	高压中性点对地静电电流/ μA	铁心和夹件对地静电电流/ μA	超声信号	局放信号	备注
8:00	25	0.02	0.05	无	无	长期空载试验后
8:10						
8:20						
8:30						
9:00						
9:30						
10:00						
10:30						
11:00						
11:30						
12:00						

表 22-6 试品 3 长期空载试验时油流静电电流测量结果

时间/t	油面温度/℃	高压中性点对地静电电流/ μA	超声信号	局放信号(A 相)/pC	备 注
18:30	25	0.02	无		开泵, 未施加电压, 从 20:00 开始施加电压
19:00	25	0.02	无		
19:30	25	0.02	无		
20:00	25	0.025	无	60	开始施加电压
20:30					
21:00					
22:00					
23:00					
24:00					
1:00					
2:00					
3:00					
4:00					
5:00					
6:00					
7:00					
8:00					

大,由 $0.018\mu\text{A}$ 升高到 $0.15\mu\text{A}$ 。当温度基本稳定时,静电电流也基本稳定。

油流带电引起的放电对于大容量变压器的安全运行,具有较大的威胁,对于油流静电电流的检测是非常必要的,应用上述方法进行检测试验,几年来,所检测通过的变压器在线运行中,尚未发现因油流静电放电所导致的事故,这说明应用上述方法进行检测具有相当的可靠性和可行性。当然上述方法尚有一定的缺陷,有待于进一步探讨和完善。

表 22-7 试品 3 在温升试验时油流静电电流测量结果

时间/t	油面温度/℃	铁心和夹件对地静电电流/ μA	超声信号	备 注
0:00	13.60	0.01	无	开泵,未加电流
0:10	13.60	0.01~0.018	无	加电流,电流由 0 升到规定值
0:15	15.20	0.025	无	电流达到规定值
0:57	35.00	0.025		
1:22	42.80	0.025~0.035		
2:00	44.15	0.05		
2:45	49.62	0.06		
3:20	50.62	0.07		
4:00	51.62	0.08		
4:30	52.71	0.095		
5:00	53.46	0.101		
5:30	54.18	0.112		
6:00	54.99	0.120		
6:30	55.84	0.130		
7:00	56.40	0.135		
7:30	56.78	0.141		
8:00	57.62	0.150		
8:30	57.71	0.150	无	降至额定电流,温升(开始)稳定
9:00	57.59	0.130	无	降至额定电流
9:10	57.15	0.125	无	
9:20	57.06	0.124	无	电流降至零,温升结束

第二十三章 干式变压器的气候、环境和燃烧性能试验

第一节 概 述

随着干式变压器技术的发展和人们对环保、安全等问题的日益关注,干式变压器的试验项目也日趋完善。目前除干式变压器现行标准规定的试验项目外,IEC60076-11:2004 标准、欧洲 HD464/S1 标准、法国 NFC52-76 标准已将干式变压器的气候试验、环境试验和燃烧性能试验规定为特殊试验。为了满足上述三项特殊试验的要求,国家变压器质量监督检验中心已于 2002 年建立了气候、环境和燃烧性能试验室,几年来,除根据企业委托进行了大量的干式变压器的气候试验、环境试验和燃烧性能试验外,还对上述三项特殊试验的试验方法和试验技术进行了大量的研究。本章将介绍上述三种特殊试验的试验标准、设备及方法。

第二节 试验标准及有关规定

1 试验标准

目前由于我国还没有干式变压器上述三项特殊试验的国家标准,所以一般均根据 IEC60076-11:2004 标准、欧洲 HD464/S1 标准和企业的技术条件及技术服务合同进行试验。

2 有关规定

2.1 气候试验分级

C₁ 级:变压器运行温度不低于-5℃,但运输和储存可到-25℃;

C₂ 级:变压器运行、运输和储存温度为-25℃。

2.2 环境试验分级

E₀ 级:变压器上无凝露,有轻微污秽,通常安装在干净的户内;

E₁ 级:变压器上偶尔有凝露,一般性污秽;

E₂ 级:变压器上经常产生凝露或严重污秽,或者二者均有。

2.3 燃烧性能试验分级

F₀ 级:无要求;

F₁ 级:变压器有火灾危险,但能限制燃烧,使有毒物质和浓烟雾减到最小。

当一台产品同时符合气候等级、环境等级和燃烧性能等级时,每个参数的试验都要在同一台产品上进行。气候、环境和燃烧性能试验分级及要求进行的试验项目见表 23-1。

表 23-1 试验分级及项目

试验分级	气候试验		环境试验			燃烧性能试验	
	C ₁	C ₂	E ₀	E ₁	E ₂	F ₀	F ₁
-5℃热冲击试验	√						
-25℃热冲击试验		√					
冷凝试验				√			
渗透试验					√		
燃烧性能试验							√

第三节 试验内容

1 气候试验

1.1 试验的有效性

其有效性可扩展到相同设计标准的变压器上。包括：相同的设计观点；相同的绕组最大温升；相同的导体材质；相同的主绝缘材料。

1.2 试验程序及方法

1.2.1 C_1 级试验

变压器置于气候试验室，其温度、湿度可以调控（见第三节）。

在试品高度 1/2、离外表面 0.1m 处，测三点平均值，作为环境温度。在试品 B 相绕组的不同位置设定温度参考点，并通过调试找到参考点温度与绕组温度的关系曲线。

(1) 气候试验室的温度在 8h 内逐步降低到 $-25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，至少维持 12h；

(2) 而后在 4h 内逐步回升到 $-5^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，至少维持 12h；

(3) 进行热冲击试验。对变压器施加 2 倍额定电流，并不断监测参考点温度，当试品温度达到确定的温度（最高温升允许值加 40°C ）时，立即断电测量绕组电阻。

热冲击试验用下列方法之一：加直流，各绕组均串联在一起；或加交流，一组绕组短路，一组绕组施加电流。

(4) 热冲击试验后变压器恢复到 $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 温度，12h 之后进行变压器的绝缘试验，绝缘试验电压为标准规定值的 80%。

对于包封绕组的干式变压器，还应进行局部放电试验，局部放电试验电压（额定电压的 160%）、时间和局部放电量应符合有关标准要求。

1.2.2 C_2 级试验

直接在 $-25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 温度下进行热冲击试验（一般均直接进行 C_2 级试验，而不进行 C_1 级试验），其试验方法与 C_1 级相同。

C_2 级气候试验程序见图 23-1。

2 环境试验

2.1 试验的有效性

同本节 1.1 项。

2.2 试验程序及方法

此试验在整台并与其他组件防护措施变压器上进行。 E_1 、 E_2 级环境试验程序见图 23-2。

2.2.1 E_1 级试验

仅进行冷凝试验。

变压器置于环境试验室，其温度和湿度可以调控（见第三节）。试验室容积至少为变压器与箱子体积的 5 倍，至墙和天花板距离不小于变压器相间最小距离并且不小于 0.15m。试验室的温度应能保持在变压器上产生冷凝，湿度要保持在 93% 以上，水的导电率在 $0.1\text{S/m} \sim 0.3\text{S/m}$ 范围内。

变压器在相对湿度不小于 93% 和不励磁下停放不

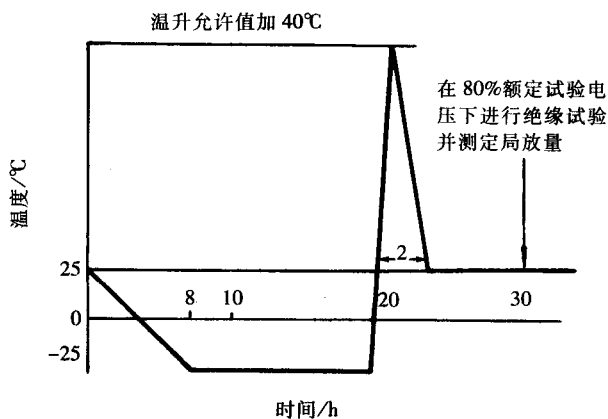


图 23-1 气候试验程序图

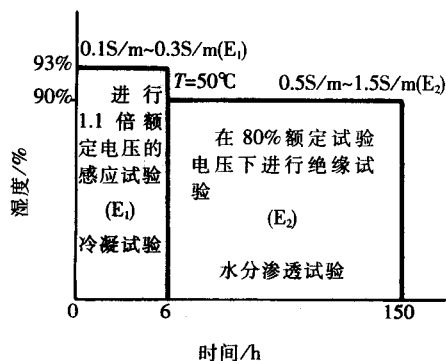


图 23-2 环境试验程序图

少于 6h 后,在 5min 内做如下感应试验。

(1)中性点直接接地或经小阻抗接地系统用的变压器,按 1.1 倍额定电压励磁,并持续 15min;

(2)中性点绝缘或经高阻抗接地系统用的变压器,按 1.1 倍额定电压励磁,并依次将每个高压端子接地,每次试验各持续 5min,间隔 5min。

在上述感应试验过程中,试品不应发生闪络,且外观检查应无严重的放电痕迹。

2.2.2 E₂ 级试验

湿度渗透试验(包括 E₁ 级冷凝试验)。试验室温度保持在 $50^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ 内,相对湿度为 $90\%\pm 5\%$,水的导电率为 $0.5\text{S}/\text{m}\sim 1.5\text{S}/\text{m}$ 。为保证潮气进入,变压器应在无励磁状态下停放 144h。渗透试验后转入正常气候条件 3h 后,再按 80%标准值进行外施、感应耐压试验。

在上述绝缘试验过程中,试品应无闪络或击穿现象发生,且外观检查应无严重的放电痕迹。

3 燃烧性能试验

3.1 概述

在变压器火灾事故中,最好是尽可能少散发有毒物质和浓烟。因此,在变压器中应尽量并避免使用卤化物。

3.2 检查散发的有腐蚀性和有害气体

应检查变压器散发的少量腐蚀性和有害物质,主要是氯化氢(HCl)、氰化氢(HCN)、溴化氢(HBr)、氟化氢(HF)、二氧化硫(SO₂)和甲醛(HCHO)等。

如果没有特定的国家标准要求,试验的细节与可接受的限值由供需双方商定。

3.3 试验的有效性

同本节 1.1 项。

3.4 试验程序及方法

试验在完整的一相变压器上进行,包含 HV 和 LV 线圈、铁心柱及绝缘件,无外壳,心柱可用近似尺寸和热特性的材料代表,铁轭可以不考虑。被试变压器可为圆形或非圆形,其绕组直径为 400mm~500mm。更大或更小尺寸的绕组按协议进行试验。

(1)试验间:试验间是专用的,壁为钢板,厚 1.5mm~2.0mm,热传导系数为 $0.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。试验间有内径为 0.35m 的进气道和 0.5m 的排烟道。国家变压器质量监督检验中心试验间详细尺寸见图 23-3。

(2)火源:主热源为酒精(热能 $27\text{MJ}/\text{kg}$),酒精面 $(30\pm 1)\text{mm}$

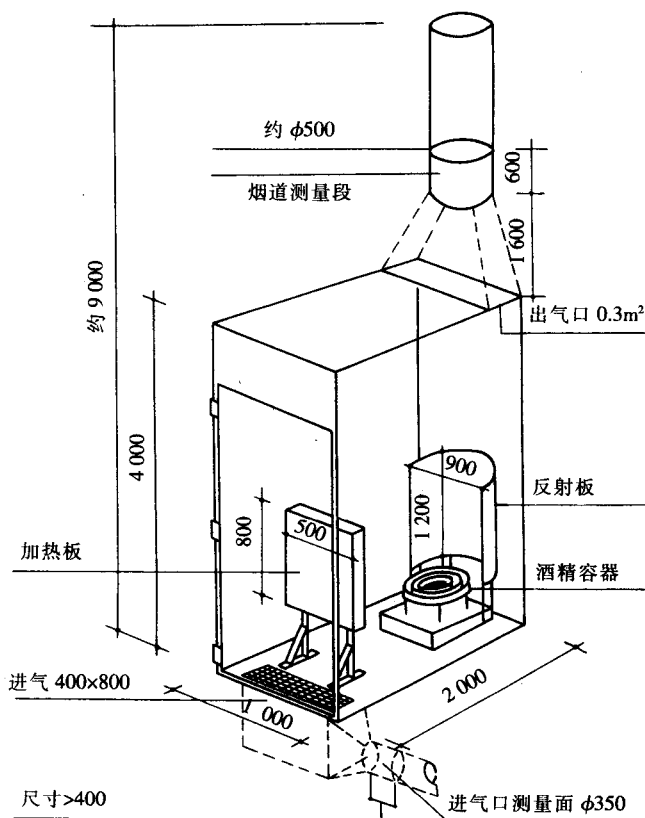


图 23-3 试验间

高,可燃烧 20min(在试验前 5min 注入),酒精液面外径大于线圈外径 100mm,内径小于线圈内径 40mm。第二热源为加热板,高 800mm,宽 500mm,热电阻 24kW。对面有高 1.2m 半圆形、直径 900mm 反射板。可调节热源温度到 750℃。加热板至线圈外表面应有约 175mm 的距离。

(3) 试验过程中要记录的温度:空气入口、烟道出气口、LV 线圈顶部、HV 线圈顶部、铁心底部、铁心—LV 线圈中间、LV—HV 线圈中间。记录温度的同时还要观察烟尘排出情况。另外,还要测量可见光的传导系数(排烟道测量段的透光率)。光学通路在烟道中的长度不小于 500mm。测量示意图见图 23-4。设传导系数为 X ,实际的光学通路长度为 P

(单位:m),则 1m 长的光学通路的 X 与时间 τ 的关系为: $\tau = X^{\frac{1}{P}}$ 。

(4) 试品空载校正:进气流量调整到稳定状态,20℃时为 0.21m³/s±15%,如是自然循环,可调进气阀,如需要,可用风扇吹进风。

(5) 试验过程及结果判定:

① 点燃酒精,并将 24kW 加热板通电,整个试验约进行 60min 左右。在整个试验期间,排气烟道测量段气体温升应不超过 420K(对环境温度,下同)。

② 在试验 40min 后切除加热板。5min(即 45min)后,排气烟道测量段气体的温升应不超过 140K,之后每隔 10min 测量一次,气体温升应呈下降趋势。

③ 试验开始 60min 后,排气道测量段气体的温升应不超过 80K,用以证明火燃烧的自熄性。

④ 在试验开始后 20min 到 60min 之间,测量段光的传导系数的平均值不应小于 20%。

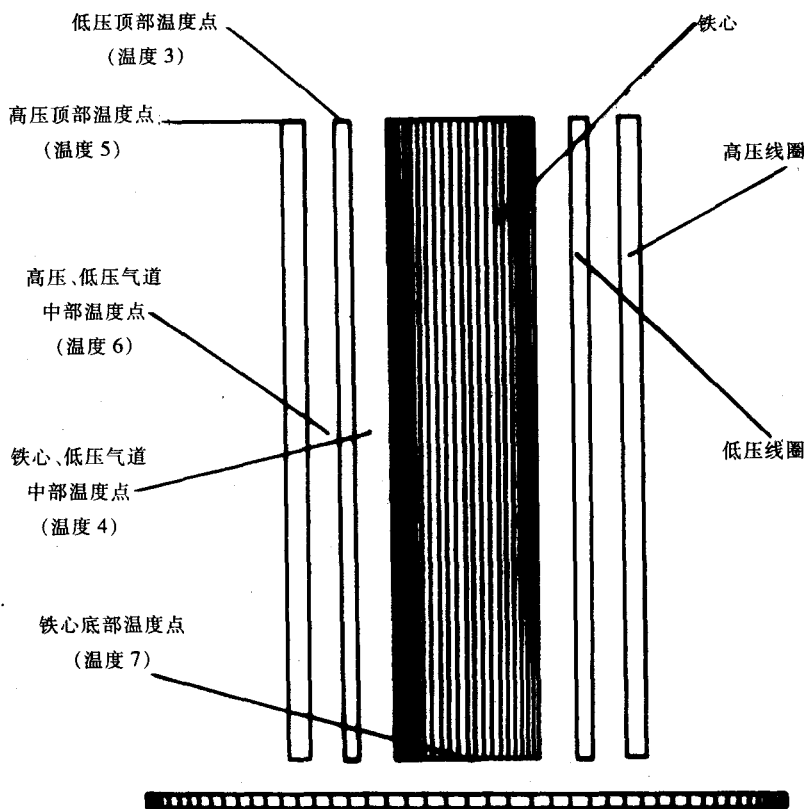


图 23-4 测量点示意图

第四节 试验实例

在国内,已有云南变压器厂生产的 Nomex 纸绝缘的干式变压器在意大利 CESI 试验室做了气候、环境和燃烧性能三项试验,顺德特种变压器厂生产的 F 级、630kVA/10kV 干式变压器在法国国家防护与保护试验中心做了燃烧性能试验。国家变压器质量监督检验中心也已进行了几十台 SCB、SGB 干式变压器的 C₂ 级气候试验、E₂ 级环境试验(企业均直接委托进行 C₂ 级和 E₂ 级试验)和 F₁

级燃烧性能试验。现给出某些典型产品的试验情况。

1 气候试验

气候试验室净容积 4m×4m×4m,为不锈钢材料,湿度调整范围:40%~98%,温度调整范围:-55℃~+85℃,有 35kV 400A 三相电流引入,地面承重 10t,可试 2 000kVA 及以下变压器。

产品气候试验之前,做全部试验项目,之后直接进行 C₂ 级试验。

试验结果:C₂ 级热冲击试验及热冲击后进行的外观检查(无开裂、变形),绝缘复试(耐压、感应、局放)合格,产品 C₂ 级气候试验合格。

2 环境试验

环境试验室净容积 4m×4m×4m,内部为有机材料,外部为不锈钢壳,相对湿度可到 90%~98%,盐水导电率可调,温度在常温至-50℃之间。有三相 35kV 400A 电源引入,地面承重 10t,可做 2 000kVA 及以下产品试验。国外多为冷冻试验室,尺寸比较大,多试隔离开关覆冰试验,亦可带盐水,做干变试验。

试验结果:E₂ 渗透试验后,在正常环境下,静放 3h 后复试绝缘电阻、外施耐压、感应耐压试验合格,产品 E₂ 级环境试验合格。

3 燃烧性能试验

为了优化变压器的性能,使其符合安全、环保要求,在它被燃烧时,必须尽量减小有毒物质与不透明烟雾的排放。燃烧性能试验在燃烧试验间进行(见第二节 3.4 (1)项)。

3.1 试验过程描述

酒精点燃并且辐射板(24kW)通电后,试验开始。酒精大约 20min 左右烧尽,辐射板在 40min 后断电。试验进行 60min。试验过程中,每隔 4min~5min 观察一次烟尘排放情况,结果见表 23-2。

3.2 试验数据的测量

光传导系数——排烟道测量段光传导系数(曲线见图 23-5,结论见表 23-3)。

温度 1——进气口温度(曲线见图 23-6)。

温度 2——排烟道测量段气体温度(曲线见图 23-7,结论见表 23-3)。

温度 3——低压线圈顶部温度。

温度 4——铁心和低压线圈间气道中部温度。

温度 5——高压线圈顶部温度。

温度 6——高压和低压线圈间气道中部温度。

温度 7——铁心底部温度。

进气流量——进气口空气流量(曲线见图 23-13)。

上述 3~7 项测量点布置见图 23-4。测量数据曲线见图 23-8~图 23-12。

3.3 能量计算

表 23-2 烟尘排放情况

时间/min	现 象
4	火焰高约 2m,有轻微烟尘冒出
8	火焰高约 2.5m,有轻微烟尘冒出,有异味产生
9	火焰高约 2.5m,有较轻烟尘冒出,有异味产生
14	火焰高约 2m,有较轻烟尘冒出,有异味产生
19	火焰高约 2m,有较轻烟尘冒出,有异味产生
24	火焰高约 1.8m,有浓烟尘冒出,有异味产生
29	火焰高约 1.7m,有浓烟尘冒出,有异味产生
34	火焰高约 1.6m,有浓烟尘冒出,有异味产生
39	火焰高约 1.5m,有浓烟尘冒出,有异味产生
44	火焰高约 1m,有浓烟尘冒出,有异味产生
49	火焰高约 0.5m,有较浓烟尘冒出,有异味产生
54	有较浓烟尘冒出,有异味产生
60	有较浓烟尘冒出,有异味产生;火焰熄灭具有自熄能力

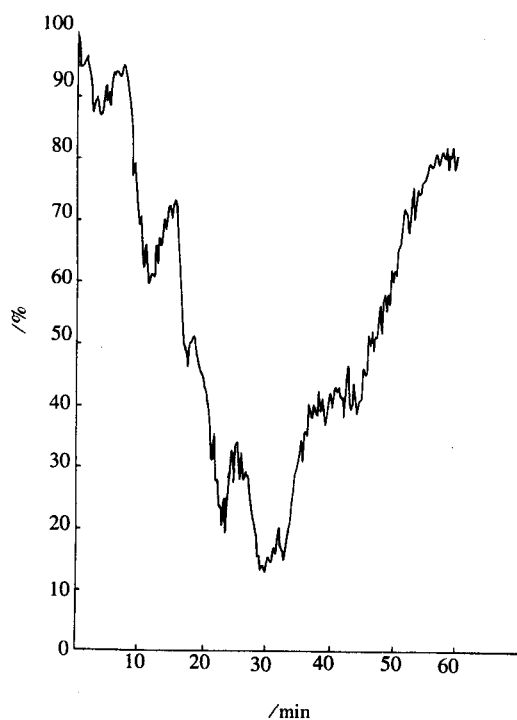


图 23-5 光传导系数

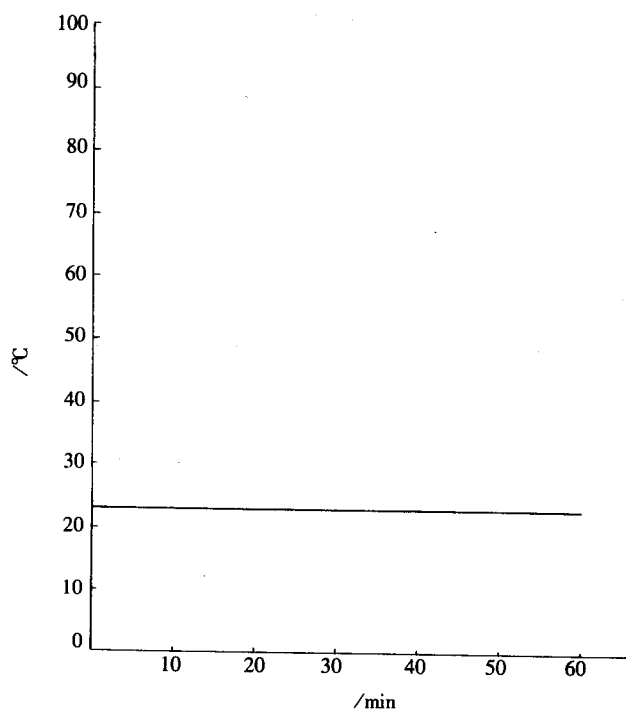


图 23-6 进气口温度

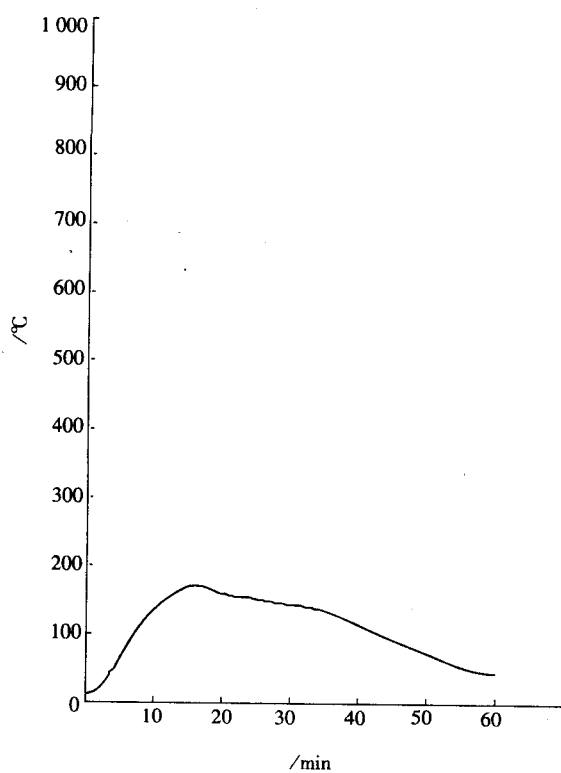


图 23-7 排烟道测量段气体温度

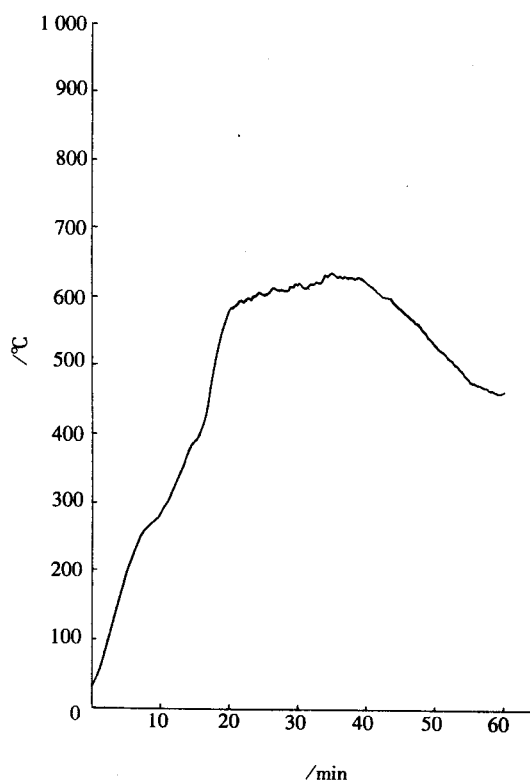


图 23-8 低压线圈顶部温度

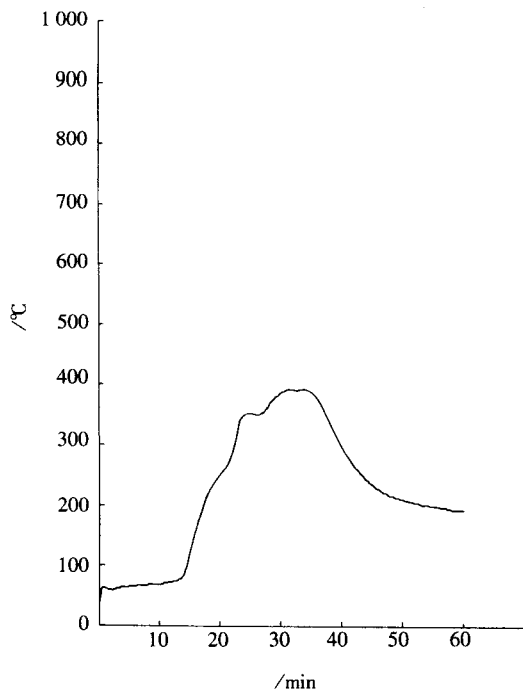


图 23-9 铁心和低压线圈间气道中部温度

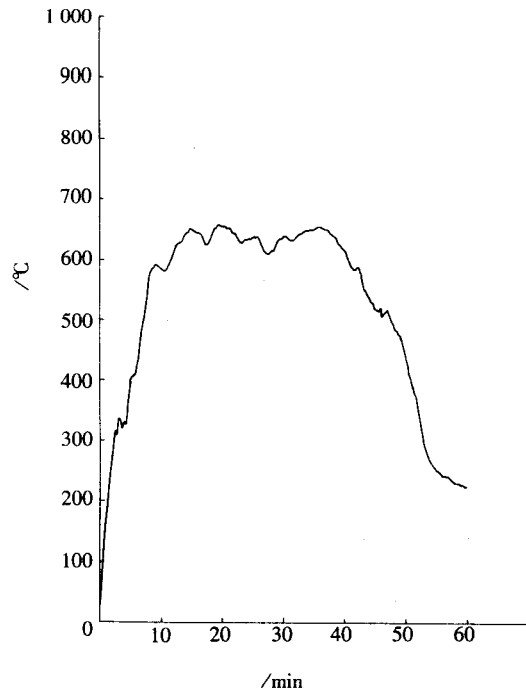


图 23-10 高压线圈顶部温度

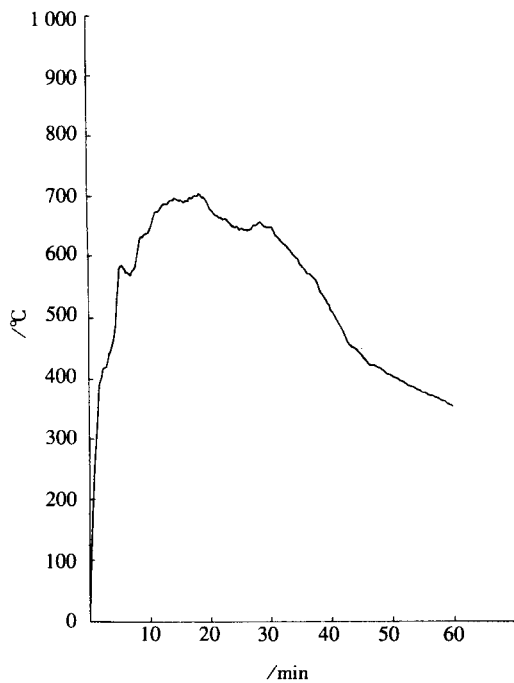


图 23-11 高压和低压线圈间气道中部温度

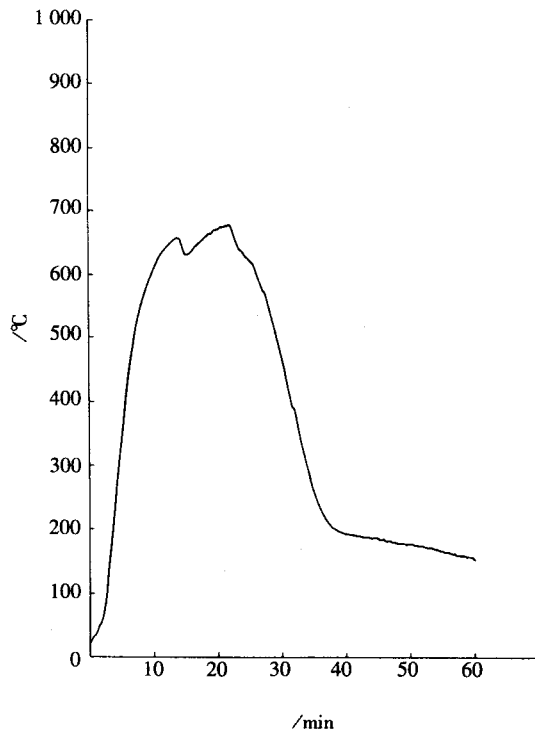


图 23-12 铁心底部温度

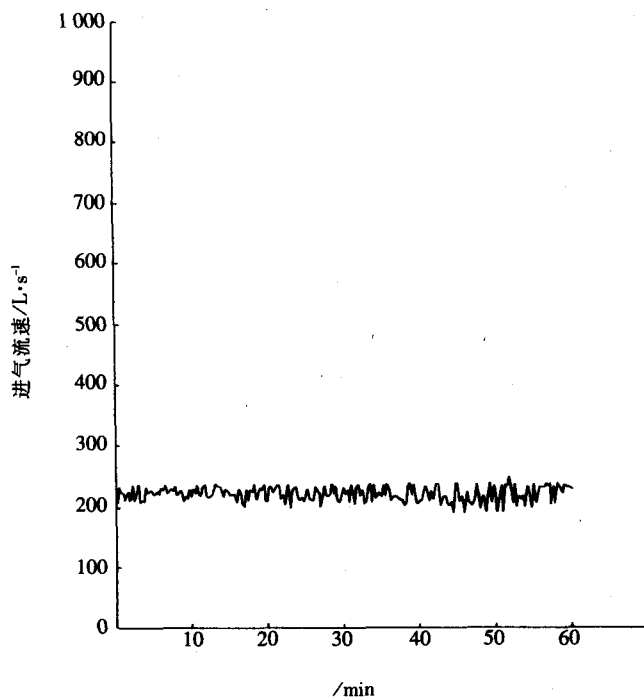


图 23-13 进气流量—进气口空气流量

表 23-3 排烟道参数测量结果

项 目	判断依据	测量值	结果	注
排烟道测量段最高温升(K)	$\leq 420\text{K}$	151K	合格	图 23-8
排烟道测量段试验开始 45min 后的温升(K)	$\leq 140\text{K}$	75K	合格	图 23-8
排烟道测量段 45min 后的温度变化趋势	下降	下降 K	合格	图 23-8
排烟道测量段试验开始 60min 后的温升(K)	$\leq 80\text{K}$	26	合格	图 23-8
试验开始后 20min~60min 间的排烟道测量段平均光传导系数(%)	$\geq 20\%$	44.9%~85.5%	合格	图 23-5

能量计算见表 23-4。

表 23-4 能量计算表

能量来源	计算参数		供给能量(MJ)
辐射板	功率(kW)	24	60.5
	操作时间(min)	42	
酒精	燃烧重量(kg)	4.3	116.1
	燃烧值(MJ/kg)	27	
试验样品	重量损失(kg)	高压线圈	9.8
		低压线圈	7.6
		绝缘垫块	1.4

可见电热板只占 1/3 能量。

3.4 试验结果的判断

此台干式电力变压器 F₁ 级燃烧性能试验的结果符合 HD464 标准及 IEC60076-11:2004 标准要求, F₁ 级燃烧性能试验合格。

第二十四章 大型变压器的现场验收试验

第一节 概 述

大型变压器的运行可靠性首先取决于其结构和制造工艺水平,其次是对设备进行的各种试验及设备的运行工况。近年来,根据现场经验,在有关标准中增加了部分电的和非电的测试内容。

变压器出厂后,运抵安装现场。为检查复核变压器的状态及安装质量,应按国家 GB50150—1991 标准《电气装置安装工程电气设备交接试验》的要求和电力用户预防事故措施要求及制造厂的技术要求进行现场验收试验。

本文将对变压器现场安装中的试验和现场安装竣工后的试验进行一些论述。

第二节 现场安装中的试验

1 测量铁心与各紧固件的绝缘及铁心引出套管对外壳的绝缘

用 1 000V 或 2 500V 兆欧表加压 1min,应无闪络及击穿现象,电阻值一般大于 1 000M Ω 。

2 套管的绝缘试验

大型变压器的套管 110kV 及以上均为油纸电容式套管,其试验项目如下。

2.1 绝缘电阻测量

用 2 500V 兆欧表测量,同时测量小套管对地绝缘。绝缘电阻值一般不低于 1 000M Ω 。

2.2 介质损耗因数及电容值测量

用高压交流电桥测量。施加电压为 10kV。测量结果为:在室温不低于 10℃的条件下,20kV~500kV 级的 $\tan\delta$ 值不大于 0.7;电容量的变化在 $\pm 10\%$ 范围内。

2.3 套管绝缘油试验

超高压变压器的套管均为全密封结构,一般不宜进行油的试验,如出现下列情况,则必须作油的试验。

- (1)套管本体介质损耗因数 $\tan\delta$ 超过规定值。
- (2)套管密封破坏或小套管绝缘电阻不符合要求。
- (3)套管重新加油时。

3 套管互感器试验

变压器套管用 CT 在套管未装于变压器油箱上前,应进行以下试验。

(1)测量二次绕组对铁心的绝缘电阻,用 1 000V~2 500V 兆欧表,电阻值一般不低于出厂值的 70%。

(2)二次绕组的交流耐压试验:

将二次绕组对地施加 2 000V 电压 1min。

(3)检查 CT 各分接头的变流比:

用变比电桥检查。

(4)电流互感器的极性校核:

现场主要用直流法。

(5) 励磁特性测量:

在电流互感器二次绕组施加电压,按电流分段上升,读取相应的电流电压值,直到饱和为止。

4 变压器油试验

在大型变压器中,油是主要绝缘介质,同时因其比热大,又是冷却介质,因此保证绝缘油具有良好的性能是至关重要的。

4.1 绝缘油的取样

采集油样是油试验中十分重要的环节,其正确与否,将给试验结果带来极大的影响。因此,要求取样器皿应是带磨口的广口棕色玻璃瓶,并经干燥处理。取样时应在相对湿度小于 75% 的晴天进行。

4.2 绝缘油电气强度试验

这项试验主要判断绝缘油中有无外界杂质和水分渗入,是判断油性能的主要试验项目。

绝缘油试验所用电极有以下几种。

(1) 球形电极:

直径 $\phi=12.5\text{mm}$, 间距 2.5mm , 油杯容积 360ml 。

(2) 球盖形电极:

曲面直径 $\phi=25\text{mm}$, 厚度 13mm , 间距 2.5mm 。

(3) 圆盘电极:

直径 $\phi=(25\pm 0.05)\text{mm}$, 厚度 $(25\pm 0.05)\text{mm}$, 间距 2.5mm 。

按照国内标准,同一油样试验 6 次,取后 5 次平均值。

试验时,应在油杯回路内串接 $1\text{M}\Omega\sim 5\text{M}\Omega$ 的电阻来限制击穿电流,以防烧坏电极,使油中游离炭过多。

4.3 绝缘油介质损耗因数测量

油的 $\tan\delta$ 值,能表征油质的老化和受潮以及受污染的程度。

现行国家标准规定测量时的温度为 $90^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$,测量时加于油的电气强度为 1kV/mm 。对于新油 $\tan\delta$ 为不大于 0.5%;220kV 以上变压器本体内油 $\tan\delta$ 时不大于 0.7%。

4.4 绝缘油体积电阻率试验

体积电阻率 ρ_v 是流过油中单位面积电流 (A/cm^2) 和单位电场强度 (V/cm) 之比。这个值相当于绝缘油每边 1cm 的立方体相对面的电阻值。它是反映油的电气性能指标的重要参数。当油中有离子和其他胶体杂物时,体积电阻率将下降。一般正常油的体积电阻率 $\rho_v\geq 1\times 10^{13}\Omega\cdot\text{cm}$ 。

4.5 绝缘油的微水量测量

绝缘油中含水量对绝缘油击穿强度和变压器固体绝缘的老化均有很大影响。特别有固体杂质共存时更为显著。在变压器安装过程中要严格控制油中水分。根据电压等级不同,含水量指标有不同的要求,如:

500kV 级: $\leq 10\mu\text{L/L}$;

220kV 级: $\leq 20\mu\text{L/L}$ 。

测量方法主要有卡尔—费休法和库伦法。

4.6 油中总气量的测定

油中的气体含量未达到饱和值时,则不会出现气泡状态,也不会影响变压器的绝缘强度,当油中含气量接近饱和值时,由于温度变化或油流加快,可能出现气泡,会使变压器局部放电起始电压下降。因此,减少含气量对保证大型变压器的安全和延长绝缘的寿命是有利的。研究表明,一个大气

压下油中含气量最低 8%左右,0~4 个大气压下为 3%左右,因此,油的处理必须在高真空下,才能将油中含气脱出。对于 500kV 级变压器的含气量,均要求在 0.5%以下。

目前,现场测量含气量的方法有托里希利真空法、CO₂ 气体洗脱法和色谱法。

5 有载调压开关试验

有载调压开关是带负载调压的主要部件,运行中要经常动作,使变压器电压满足用户要求,因此,有载开关质量的好坏,直接影响电网的安全运行,必须进行试验。

一般调压装置作为单元设备,在制造厂要进行型式试验和出厂试验,但在现场安装时,还应进行以下试验。

5.1 工作顺序(分离角测量)测量

在现场一般只进行正向 3-4-5、反向 4-3-2,以验证开关的原始状态。

5.2 切换程序测量

主要检查切换开关触头动作是否正常,切换时间有无变化,一般为 60ms 或对照厂家试验数据。

5.3 触头接触电阻检查

主要检查触头的接触情况及其接触稳定性。

5.4 转动力矩测量

有载调压装置装设完毕后,在手动把手上套上力矩表,然后切换上升和下降分斗,记录力矩表的读数,一般小于 29.4N·m,对超高压变压器的实测数据,正常时均在(9.31~9.8)N·m。

第三节 现场安装竣工后的试验

变压器在现场安装竣工后,应进行如下试验。

1 试验项目

- (1)线圈直流电阻测量。
- (2)所有分接头的变压比例。
- (3)三相变压器的组别或单相变压器极性检查。
- (4)绕组连同套管的绝缘电阻和吸收比或极化指数测量。
- (5)绕组连同套管的介质损耗测量。
- (6)绕组连同套管的直流泄漏电流测量。
- (7)绕组连同套管的交流耐压试验。
- (8)感应耐压试验或操作冲击耐压试验。
- (9)110kV 及以上变压器的局部放电试验。
- (10)空载电流和空载损耗测量。
- (11)阻抗电压和负载损耗测量。
- (12)噪音测量。
- (13)冲击合闸试验。

上述试验项目及方法在现行国家标准中均有明确规定,在此不作详述,仅对现场操作波耐压试验和局部放电测量作一介绍。

2 操作冲击耐压试验

随着变压器电压水平和容量的迅速增长,需对绝缘试验方法有新的认识,许多国家进行了操作波试验的研究,认为在交流电压提高到 400kV 以上,并降低绝缘水平时,对变压器应着重考虑耐受

操作波冲击的强度。目前这项试验技术除作为超高压变压器出厂必试项目之外,在有关国家电力运行部门已作为现场检查变压器的绝缘状况的手段。我国在电气设备预试标准中已明确用操作波试验替代工频感应耐压试验。

操作波试验的电压波形、幅值、极性如下。

2.1 电压波形

波头时间: $T_1 \geq 100\mu s$

波长: $T_2 \geq 500\mu s$

90%幅值持续时间: $T_D \geq 200\mu s$

反峰电压值: $V_{zm} \leq 0.5U_m$

操作波波峰上,允许高频振荡分量幅值不大于 5%,这种波形的频率不高,沿变压器的绕组的电压分布,基本是均匀的。

2.2 电压幅值确定

目前,国内在现场进行变压器操作波试验的电压是国标 GB311 规定的工频 1min 耐压值折算而来,即按下式折算:

$$U_{操} = 1.35 \times \sqrt{2} \times U_{50} \times 0.85$$

式中 1.35——油纸绝缘的操作冲击系数。

电力部门现场操作波试验时选取的电压值见表 24-1。

500kV 级变压器现场操作波试验电压值可与制造厂协商确定,但不低于 70% 出厂电压值。

2.3 电压极性

变压器操作波试验,推荐采用负极性(第一个半波的极性),因为对外绝缘而言正极性操作波的闪络电压较负极性低很多,而变压器内绝缘都无明显的极性效应,考虑试验时免于外绝缘先行闪络,采用负极性波较为有利。

2.4 加压次数

在 50% 试验电压下,调整波形,求出波发器的效率和校核分压器,升至 80%,试验电压加压 3 次,再次核定回路效率、容升等,然后升至 100% 试验电压冲击 3 次,录取电压、电流波形,进行分析判断。

2.5 故障判断

2.5.1 主绝缘击穿的波形特征

当试验电压升至一定幅值,主绝缘击穿电压突然下降,并产生振荡,同时电流突然上升。有时因变压器油的消弧作用,使击穿点绝缘强度恢复,电压可能又继续上升。

2.5.2 匝绝缘击穿

大型变压器高压绕组的匝数较多,当绕组发生 1~2 匝击穿,引起电压、电流变化不大,但由于短路时,线匝内有电流,相当于电阻损耗,从而使试验回路效率降低,波头时间缩短,波尾下降很快,电流波形中的电感分量与电压不足 90° 关系,电感电流明显前移,与电压同相。

3 现场局部放电试验

在电压的作用下,绝缘结构内部的气隙、油膜或导体的边缘发生非通道性的放电现象称之为局部放电。

表 24-1 现场操作波试验电压值

设备额定电压/kV	工频 1min 耐压/kV	操作波试验电压(kV 峰值)
110	200	318
220	395	640
330	510	827
500	680	1 103

对变压器而言,干燥不彻底,浸渍不完善,含有气泡,裸金属构件与固体绝缘件有尖角,结构件中有悬浮电位等,均会发生局部放电。特别是在开放式油隙中,一旦发生局部放电就会持续发展,造成绝缘累积损坏,因此,对大型变压器进行局部放电测量,能及时有效地发现变压器制造和安装工艺中的缺陷,对确保变压器安全运行有重要意义。

局部放电的试验方法:

3.1 变压器局部放电试验电压和持续时间按国标 GB1094.3-2003 规定

3.2 试验电源

在现场作变压器感应耐压或局部放电试验时,多用提高电源频率的办法,如中频发电机组,三倍频发生装置和无局放调频电源等。

3.3 局部放电的测量

3.3.1 局部放电试验测量装置

局部放电的测量装置应具备下列特性:

- (1)能将放电电荷作为测量值。
- (2)能够观察放电电荷随时间变化。
- (3)具有频带宽的放大器,50kHz~200kHz 的响应特性。
- (4)能显示出局部放电脉冲和施加电压的相位关系。

3.3.2 测量回路的校正

把包括被试变压器、测量电缆、测量装置、试验电源在内的回路,在试验电压施加之前,按下列顺序进行校正。

(1)将脉冲发生器的输出电压 U_0 通过 C_0 作为已知电荷 ($q_0=C_0U_0$) 注入变压器的被试端和地之间。

(2)在被试端注入已知电荷时,读取测量装置的读数。三相变压器逐相校正。

(3)算出测量装置的读数和注入电荷的换算系数,即仪器刻度系数。

3.3.3 干扰的抑制

现场进行局部放电测量时,干扰能否抑制是保证测试顺利进行的关键。

实践表明,干扰来自以下几类:

(1)来自广播、载波、电晕、电焊及尖端放电的空间干扰。防止办法是因地制宜的选择频带范围,一般用 40kHz~200kHz。

(2)来自电源及试验内部的放电。

一般或在电源侧加电容器,其次加装隔离变压器。

(3)将所有高压连线采用 $\phi 25 \sim \phi 50$ 的铝金属软管。

(4)将处于高电位的尖端加防晕罩。

3.3.4 测量结果的分析

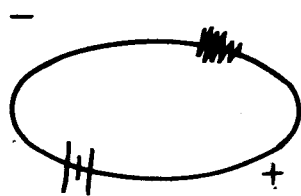
正确分析局放试验结果是测试技术的重要部分,由于局部放电是一种随机性很强的物理现象,因此要求试验人员细心观测。

(1)放电图谱的识别见图 24-1。

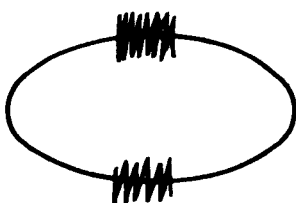
(2)采用多端校正,多端测量判定放电位置。

将已知电荷注入一对端子间,同时测量其他各对端子的电荷量,以鉴别放电量大的部位。

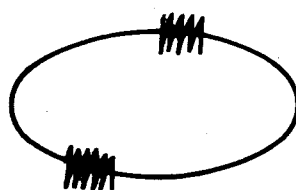
总之局部放电测试是一项细致的工作,要不断积累经验,才能有效的监测设备的绝缘性能。我国对于超高压变压器在现场安装后进行局部放电测试已有近千台次的经验,从中能有效地发现绝



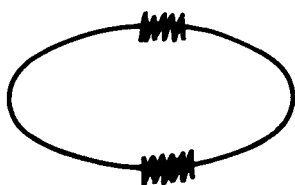
(a)空气中放电



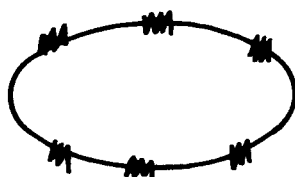
(b)电晕放电



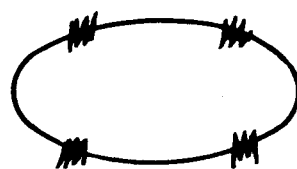
(c)绝缘中有气泡



(d)油中放电



(e)外部干扰



(f)接触性局部放电

图 24-1 局部放电典型波形

缘缺陷,防患于未然,保证变压器投运后的安全、可靠运行。

第二十五章 分接开关试验

第一节 概 述

分接开关是在变压器不加励磁或带负载条件下连接和切换分接抽头的装置。它能改变绕组的有效匝数,调节电压比。因此,它是变压器的一个重要组件。分接开关按带负载或不带负载切换条件分为有载分接开关和无励磁(无载)分接开关。

分接开关试验的目的是验证分接开关性能是否符合国家、部颁标准或国际标准和企业的技术要求,以及该产品在设计及工艺制造上可能存在影响运行的各种缺陷。并通过对试验数据的分析,从中发现问题,由此可以找出改进设计、提高工艺性的途径,以保证该产品实际使用中能正常地和安全可靠地运行。

1 试验的分类

分接开关的试验分为型式试验、例行试验、验收试验、研究性试验和现场试验五种。前三种为考核性试验,后两种为非考核性试验。

考核性试验是确定新产品的定型投产,保证老产品的质量稳定和准许产品出厂及使用的一种法定考核试验。考核性试验要严格按照产品有关标准或技术条件的规定进行试验,并且要对试验结果进行判定,以确定其合格与否。因此,产品有关标准或技术条件对考核性试验内容有明确规定。非考核性试验属于产品标准规定以外的试验,但它对提高产品性能,保证产品质量是不可缺少和极为重要的试验。

1.1 型式试验

型式试验包括新产品定型试验和产品定期型式试验。此外,当不经常生产的产品再次生产时或者产品零部件设计、制造工艺、关键原材料做重要更改,而这种更改影响到产品性能时也应进行部分或全部项目的型式试验。

新产品定型试验是按产品标准所规定的项目进行的考核性试验,目的是验证新产品设计的合理性和投产的可能性。

老产品定期型式试验是指某型号产品在投产后每隔一定年限按产品标准规定的项目进行考核性试验,目的是保证批量生产的老产品质量的稳定性。因此,型式试验产品必须是生产中有代表性的,即必须是从批量生产产品中随机抽取的。

型式试验是全面考核产品技术指标。某些试验具有破坏性。

1.2 例行试验

例行试验则是对批量生产产品每一批中每一台在出厂前按标准规定的项目进行的检查性试验。例行试验的项目是型式试验项目中的一部分,而且是“非破坏性”项目,目的是考核和保证每台产品性能的可靠性。

为了保证每台产品性能的可靠性,往往需要进行半成品试验。即根据制造厂制定的试验指导性技术文件(零部件技术条件)所规定试验项目和技术要求,对产品中的半成品进行检查性试验,目的在于及时发现半成品质量问题,并在转入下道工序之前予以排除。

1.3 验收试验

验收试验包括有入库验收试验、功能性操作试验和运行前验收试验。这是用户为保证产品质量而进行的考核性试验。

入库验收试验指的是变压器制造厂对交货分接开关按其开关制造厂出厂标准进行重复性试验,目的在于判定产品在交接运输中是否遭受意外损伤或发生变化。

功能性操作试验指的是分接开关在变压器上安装后所进行的功能性操作试验,目的在于考核分接开关安装的正确性。它是变压器例行试验的一个重要项目。

运行前验收试验指的是分接开关随同变压器运到工作地点安装后,即将投入运行前的验收试验。这是按照“变压器运行规程”中规定的试验项目进行试验,目的在于判定分接开关随同变压器运输过程中是否遭受意外损伤或发生变化,同时也考核现场安装的正确性。

1.4 研究性试验

研究性试验包括的内容很广泛,主要有下述几种:

(1)为研究新产品或为现有产品结构的改进和性能的提高而进行的某些探索性试验。

(2)为探索采用新技术、新工艺、新材料的可行性而进行的试验研究。

(3)对批量生产中所发生的产品质量问题,为了找出原因而进行的试验研究。

(4)为材料代用问题而进行的试验研究。

(5)为深入研究产品某些性能而进行的试验。

研究性试验的目的在于提高产品性能、保证产品质量和提高产品经济性。

1.5 现场运行试验

现场运行试验是对新研制的产品在经过型式试验考核合格后而继续进行的一种运行试验,是把产品安装在有代表性的一些使用单位中进行长期现场试运行。在运行试验期间要求定期地观察产品使用情况和测量必要的一些数据并记录下来以供分析。现场运行试验目的是补充定型试验的固有局限性,例如定型试验的各试验项目都是分开进行并属于模拟性质的,因此难免与实际使用情况不完全一致。而现场运行试验对试品的考验则是在实际使用的条件下进行,显然有其更真实性的一面。

2 试验项目、内容和程序

试验项目是与产品技术要求相对应的。表25-1列出分接开关的基本试验项目和相应的技术要求。试验内容是指表25-1中各试验项目所包含的内容。这些考核性试验项目的内容是由产品标准或技术条件的要求所确定的。

试验程序概念实际上有两种含义,一种是指同一台产品必须进行几个项目的试验时存在先后顺序问题。当试验先后顺序对试验结果有一定影响时,顺序的规定就更为必要。另一种试验程序含义是指某一项目的试验中有不同试验方式时、试验方式先后的顺序。下面所涉及的试验程序是指前一种。

试验程序问题首先与同一试品上是否要进行几个项目试验有关。很显然,同一试品上进行多项的试验考核,对产品质量的要求是十分严格的。

型式试验和例行试验是保证产品质量的两种性质不同但又相辅相成的考核性试验。前种试验,其特点是试验项目全面,但试样是选取有代表性、数量不多的典型产品。而例行试验对每台产品进行考核,但试验项目是有限的。

对于简易型分接开关,如果制造厂与用户预先达成协议,则表25-1有些试验项目可以省略。

在例行试验中,允许调整试验顺序。但在型式试验中,基本上按表25-1的顺序进行,但允许对型式试验合并和调整以及变更顺序,此时必须说明更换试验顺序的依据。

表25-1 分接开关试验项目

顺序	试验项目	技术要求		试验种类	备 注
		有载分接开关	无励磁分接开关		
1	一般性检查	符合技术条件	符合技术条件	例行试验	
2	触头参数测量	符合技术条件	符合技术条件	例行试验	包括触头压力、超程、开距
3	导电回路电阻测量	符合技术条件	$\leq 350\mu\Omega$	例行试验	包括触头接触电阻
4	转动力距测量	符合技术条件	见表 14-2	例行试验	
5	动作顺序测量	符合技术条件	符合技术条件	例行试验	
6	机械运转试验	符合技术条件	—	例行试验	
7	油室密封试验	见第二节中 2.2(6)	见第二节中 1(7)	例行试验	
8	绝缘强度试验	见第二节中 2.1(8)	见第二节中 1(5)		在新油中进行试验
9	电动机试验	见第二节中 2.3.3	见第二节中 1(4)	例行和型式试验	
10	干燥处理后功能试验		见第二节中 1(8)	型式试验	重复序2、3、4、5、6、7、8试验
11	机械寿命试验	见第二节中 2.2(8)	见第二节中 1(8)	型式试验	包括低温操作试验
12	切换试验	见第二节中 2.2(1)、(10)	—	型式试验	包括过渡电阻连续切换试验
13	温升试验	见第二节中 2.2(11)	见第二节中 1(6)	型式试验	
14	短路电流试验	见第二节中 2.2(12)	见第二节中 1(9)	型式试验	
15	绝缘耐压试验			特殊试验	在油中进行
16	油室试验			特殊试验	包括密封超压保护和机械强度试验
17	其他试验			特殊试验	按协议进行

3 试验方法和试验合格的判定

试验方法是产品标准或技术条件中与技术要求或试验项目相对应的内容,也就是每一个考核指标或试验项目都相应地有一试验方法。因为不同的试验方法可能得到不同的试验结果,对于考核性试验来说就可能出现合格和不合格的两种不同结果。因此,试验方法在产品标准中也是重要的内容之一。

试验方法应包括试验设备、试验线路、操作程序和测量方法等规定。考核性试验最终必须对试样是否合格进行判定。因此,合格的判定在产品标准中也是很重要的内容。有些试验项目只有在试验结束后进行一系列检查、分析后才能判断是否合格。

第二节 技术要求

分接开关的技术要求是由分接开关的标准(国际标准、国家标准或企业技术条件)所确定。现行的有载分接开关和无励磁分接开关的国标及行业标准如下:

JB/T 8637—1997 《无励磁分接开关》

GB 10230—1988 《有载分接开关》

GB/T 10584—1989 《有载分接开关使用导则》

JB/T 8314—1996 《有载分接开关试验导则》

DL/T 574—1995 《有载分接开关维修导则》

1 无励磁分接开关

(1) 额定值:额定通过电流:20、63、125、250、400、500、630和1 250A;额定电压等级:10、35、63、110和220kV;额定调节范围:±5或2×2.5%;分接位置数:3或5。

(2) 触头压力:符合JB/T 8637—1997的规定。

- (3)触头接触电阻:不大于 $350\mu\Omega$ 。
- (4)转动力矩:符合表25-2的规定值。

表 25-2 无励磁分接开关转动力矩

额定通过电流/A	20~63	125~250	400~500	630~1 250
转动力矩/N·m	≤5.0	≤10	≤15	≤20

(5)绝缘水平:油中绝缘水平见表25-3。110kV及以上无励磁分接开关,应进行局部放电的测量。

表 25-3 无励磁分接开关绝缘耐压试验值

额定电压等级 /kV	调压部位和范围	雷电冲击全波(1.2/50μs)峰值/kV			工频耐受电压(有效值/kV,1min)		
		对地	相间	定触头间 动定触头间	对地	相间	定触头间 动定触头间
10	中性点调压±5%	—	—	—	42	10	10
	中部调压±5%,±2×2.5%	—	—	—	42	42	18
35	中性点调压±5%	—	—	—	95	35	12
	中部调压±5%,±2×2.5%	200	200	90	95	95	30
63	中部调压±5%	325	325	150	140	140	45
110	中部调压±5%	480	480	175	230	230	55
220	中部调压±5%,±2×2.5%	—	—	285	—	—	90

- (6)触头温升:长期载流触头在1.2倍额定通过电流下对周围介质的稳定温升不超过20K。
- (7)密封试验:开关的密封部位应承受静油压 $6\times10^5\text{Pa}$ 不渗漏。
- (8)机械寿命:手动无励磁分接开关应能承受1万次分级操作;电动无励磁分接开关应能承受10万次分级操作。
- (9)短路试验:开关长期载流触头应能承受2s的短路电流试验,短路试验电流见表25-4规定。

表 25-4 无励磁分接开关短路电流试验值

额定通过电流/A	20	63	125	250	400	500	630	1 000	1 250
热稳定电流/kA	0.5	1.57	2.5	5.0	6.0	7.5	9.45	10	12.5
动稳定电流/kA	1.25	3.9	6.25	12.5	15	18.75	23.6	25	31.25

2 有载分接开关

2.1 额定值

有载分接开关的额定值有下述基本参数:

2.1.1 额定通过电流

有载分接开关中,通过分接开关流向外部线路的电流。这个电流在相关级电压下,能被分接开关从一个分接转移到另一个分接,并能被分接开关连续负载。

额定通过电流与一个相关级电压相联系。所以,一台有载分接开关可以有各种不同的额定通过电流与对应的相关级电压的组合。

2.1.2 最大额定通过电流

有载分接开关中,用以进行触头温升试验和开关负载切换试验的额定通过电流。

最大额定通过电流的优先值是120A、250A、500A、800A、1 200A、1 600A及2 000A。

2.1.3 额定级电压

对应于每个额定通过电流,接到变压器相邻分接上的分接开关两端子间的最大允许电压。

对应于每个额定通过电流所给定的级电压称为“相关级电压”。

2.1.4 最大额定级电压

分接开关设计额定级电压的最大值。

最大额定级电压的优先值是300V、600V、1 000V、1 500V、2 000V、3 000V、4 000V及5 000V。

2.1.5 额定级容量

级容量定义为级电压和负载电流的乘积,即 $P_s = U_s I$ 。

额定级容量是分接开关在连续工作条件下最大级容量。对于某一范围允许负载,其额定级容量系可表示成一范围曲线(图25-1)。此范围由图25-1中的横坐标上的负载电流和纵坐标上的最大允许级电压所限定。在此界限间的曲线上的负载是分接开关的额定值。

2.1.6 额定频率

分接开关设计的交流频率,通常系指工频。

对于 $16\frac{2}{3}$ Hz的分接开关,由于燃弧时间长,因此过渡电阻尺寸设计较大。

2.1.7 相数

分接开关本身结构的相数,一般有三相和单相两种之分。三相分接开关中各相对应触头并联可以作为单相分接开关。两相为特殊设计。

2.1.8 额定绝缘水平

额定绝缘水平主要指分接开关对地、相间和需要绝缘的那些部分的冲击及工频试验电压的耐受值。

额定绝缘水平是由额定(系统和变压器)绝缘级次(10kV、20kV、35kV、60kV、110kV、150kV及220kV)、分接部位(中性点、中部或线端)以及调压方式(线性调、正反调或粗细调)等所决定。一句话,分接开关额定绝缘水平与变压器调压绕组绝缘水平的要求相同。

分接开关的绝缘分为对地绝缘和内部绝缘两种。对地绝缘也称为主绝缘,即指分接开关带电体与接地部分的绝缘,它由交流工频一分钟电压试验值和冲击电压试验值所决定。内部绝缘也称为纵绝缘,即指同一分接开关各带电体之间的绝缘,例如级间、最大与最小分接间、任意分接相间绝缘等等。内部绝缘则主要由冲击电压试验值所决定。

分接开关对地绝缘水平的要求见表25-5。

分接开关内部绝缘水平取决于变压器的绝缘水平。目前还没有标准的绝缘水平值来确定分接开关内部绝缘尺寸,仅根据图25-2有载调压变压器内部绝缘距离上呈现的电压负荷,按使用频次和概率统计规律,综合考虑其通用配合要求,把分接开关内部绝缘水平划分为5~6种规格等级,即可经济地满足整个使用范围。

表25-6所示的是组合式分接开关的分接选择器结构规格及其相应的绝缘水平。对于复合式分接开关,内部绝缘水平基本上要与绝缘等级相适应,如表25-7所示。

2.1.9 调压方式和调压级数

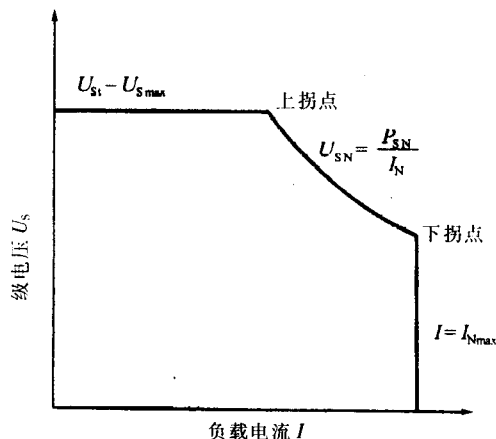


图25-1 额定级容量下的级电压 U_s 与负载电流 I 的相互关系

表 25-5 有载分接开关对地绝缘水平

电压等级 /kV	设备最高工作电压 U_m /kV	标准雷电冲击电压(峰值)/kV		交流工频试验电压 /kV, 50Hz, 1min	操作冲击电压 /kV, 250/2 500 μ s
		全波 1.2/50 μ s	截波 2~5 μ s		
10	11.5	75	85	35	—
15	17.5	105	115	45	—
20	23	125	140	55	—
35	40.5	200	220	85	—
60	69	325	360	140	—
110	126	480	530	200	—
150	170	750	865	325	—
220	252	950	1 050	395	850
330	363	1 175	1 300	510	950
380	420	1 425	1 550	630	1 050
500	550	1 550	1 675	680	1 175

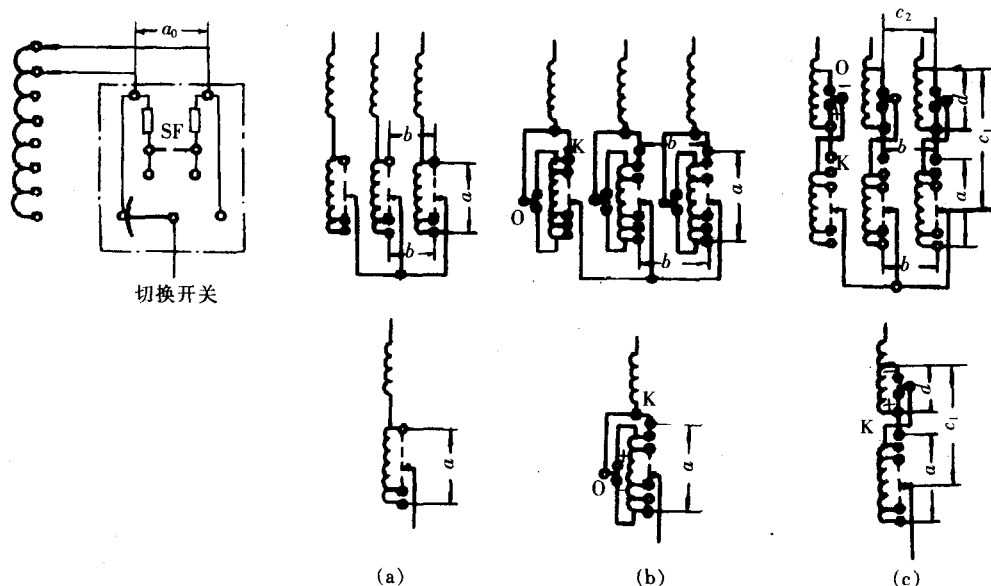


图 25-2 有载调压变压器内部绝缘距离

(a)线性调 (b)正反调 (c)粗细调

a —同相调压绕组最大分接与最小分接间 b —调压绕组任一分接点相间或粗调绕组端点相间

c_1 —同相粗调绕组始终端与任一分接点间 c_2 —粗调绕组始端相间

d —同相粗调绕组始端与终端间 a_0 —级间

基本调压方式分为线性调、正反调和粗细调三种,如图25-3中所示。线性调为基本绕组加上线性调压绕组,调压范围一般为15%。正反调为基本绕组,可正接或反接调压绕组,在相同的调压绕组上,调压范围增加了一倍。粗细调虽然有较大调压范围,但从绝缘观点看,绕组结构布置复杂。三种基本调压方式的应用取决于电力系统的要求和变压器的设计参数。正反调和粗细调的调压方式的应用以变压器最低位置和最高位置的短路电压变化而定,尤其是当变压器并联运行时更要注意此点。一般来说,线性调压和正反调压适用于电力变压器,而粗细调压则多用于调压范围较大的工业变压器,目前粗细调压也向电力变压器延伸。

分接开关调压联结方式分为星形中性点联结和三角形联结两类,如图25-4所示。

表 25-6 有载分接开关内部绝缘水平

kV

选择器尺寸规格 绝缘水平 绝缘距离符号	ZY1A(A)								ZY20(T)			
	A		B		C		D		DE		E	
	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min
a	135	50	265	50	350	82	460	105	530	105	670	180
b	135	50	265	50	350	82	460	146	530	146	670	180
c ₁	200	95	485	143	545	178	590	208	590	208	820	250
c ₂	200	95	495	150	550	182	590	225	590	225	820	280
d	135	50	265	50	350	82	460	105	530	105	670	180
a ₀	不带过电压保护		50Hz, 1min; 30kV; 1.2/50 μ s; 130kV									
	带 SF 保护		50Hz, 1min; 20kV; 1.2/50 μ s; 90kV									
	带 ZnO 保护		50Hz, 1min; 3U _{LN} (级电压); 1.2/50 μ s; 80kV									

注:表格中所列数字为 ZY1A(M)、ZY20(T)分接开关的绝缘水平;SF 为火花间隙。

表 25-7 FY30(V 型)复合式有载分接开关内部绝缘水平

kV

规格	a						b						c ₂		d	
	10 个触头		12 个触头		14 个触头		10 个触头		12 个触头		14 个触头		1.2/50 μ s		1.2/50 μ s	
	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min	1.2/50 μ s	50Hz 1min
FY30-Ⅲ 200/350Y							200	72	180	72	170	72	350	140		
FY30-Ⅲ 200/350D	200	50	180	50	170	50	同主绝缘水平						同主绝缘水平		200	53
FY30-Ⅰ 350/700							—						—			

注:1.内部绝缘水平取决于选择开关触头数目。

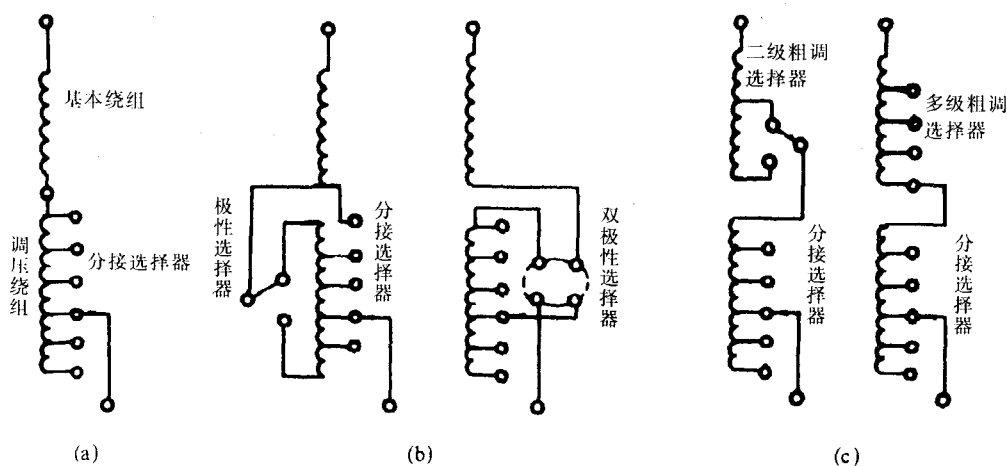
2.级间绝缘水平 a₀ 与 a 相同。

图 25-3 三种基本调压电路

(a)线性调压 (b)正反调压 (c)粗细调压

三相星形中性点调压,其调压绕组可以做成分级绝缘,其绝缘水平低,且可采用一台星形联结的分接开关。因此,结构紧凑,是电力变压器最普遍采用的调压电路,也是最经济的调压电路。三角

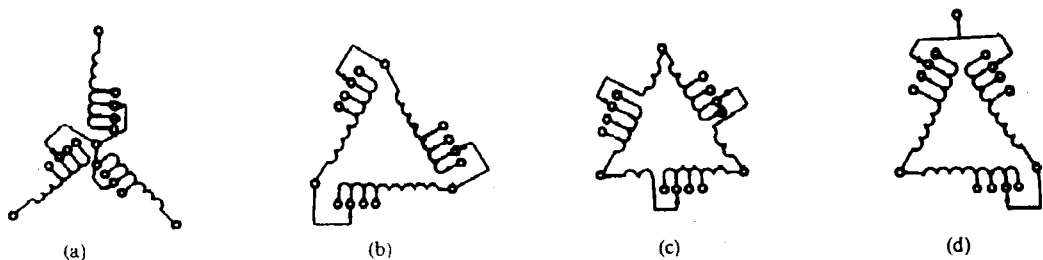


图 25-4 三相调压电路

(a)星形三相中性点调压 (b)三角形联结线端调压 (c)三角形联结中部调压 (d)三角形联结二相+一相线端调压

形联结调压电路的选择取决于设备的最高电压、变压器阻抗及其冲击水平、设备承受短路电流的能力及其分接开关自身方案等参数。三角形联结线端调压,常用于 $U_N \leq 60\text{kV}$,可用一台三相三角形接法的分接开关。额定电压 U_N 为 $110\text{kV} \sim 220\text{kV}$ 时,须用三个单相分接开关。三角形联结中部调压比线端调压经济,允许降低调压绕组和分接开关的绝缘水平。三角形联结调压电路仅适用于高压三角形联结的电力变压器。对于三角形联结二相+一相线端调压则仅在额定电压 U_N 为 $110\text{kV} \sim 220\text{kV}$ 时,在特殊情况下采用。此时,这种调压电路不需要三个单相分接开关,只采用两个特殊设计的分接开关就可以满足调压的要求,因此经济性比较好。

对于线性调压方式,调压级数 n 等于分接开关最大工作位置数 K ,即 $n=K$ 。对于正反调或粗细调的调压方式,调压级数 n 等于两倍分接开关最大工作位置数 K 减去中间位置数 m ,即 $n=2K-m$ 。如10 191W或G(± 9)调压级数 $n=2 \times 10 - 1 = 19$ 。而10 193W或G(± 8)调压级数 $n=2 \times 10 - 3 = 17$ 。

2.2 性能参数

- (1)触头参数:触头接触压力、超程和开距应符合分接开关技术条件规定。
- (2)导电回路电阻:触头接触电阻、分接开关及其主要部件(切换开关、分接选择器、转换选择器或选择开关)等导电回路电阻及过渡电阻均须符合分接开关技术条件规定。
- (3)转动力矩:符合分接开关技术条件的规定。
- (4)动作顺序:触头变换程序和触头动作顺序均须符合分接开关技术条件规定。
- (5)机械运转:分接开关联结、调试及运转符合分接开关技术条件规定。
- (6)密封试验:分接开关油室承受 $6 \times 10^4 \text{Pa}$ 油压24h无渗漏。
- (7)绝缘强度:包括绝缘的电气强度、机械强度、热稳定性和理化性能等方面的要求。这些要求均须符合分接开关技术条件规定。
- (8)机械寿命:大于50万次分接变换操作,其中100次在 -25°C 低温操作。
- (9)切换能力:包括工作负载切换和开断能力两个内容。工作负载切换是在最大额定通过电流和相关级电压下不少于5万次切换操作;开断能力是在两倍额定容量下进行40次切换操作,即在 $2I_{N\text{max}}$ 、 U_s 和 $2U_{S\text{max}}$ 、 I 的极限条件下各切换40次。
- (10)过渡电阻连续切换:在1.5倍最大额定通过电流和相关级电压下连续切换半个操作循环,其电阻器对周围介质允许温升为:空气环境, $\leq 400\text{K}$;油介质, $\leq 350\text{K}$ 。
- (11)触头温升:长期载流触头在1.2倍最大额定通过电流下对周围介质的稳定温升不超过 20K 。
- (12)短路试验:热稳定性能承受施加三次短路电流冲击,每次持续时间为 2s ,短路电流有效值见图25-5所示。动稳定性是以三次试验初始峰值电流达到短路电流有效值的25倍来考核。

2.3 结构要求

为了保证分接开关工作可靠性,对分接开关结构性能提出比较严格的结构要求。

2.3.1 切换机构油室

对于埋入型分接开关,其切换机构要埋入变压器油箱内,需要一个单独油室,防止负载切换中产生油污与变压器油箱内的油相混。因而,切换机构油室应满足下述要求:

(1)应有良好的密封性能。当油室中充满变压器油时,不应发生渗漏。油室头部暴露在空气中部分,不应存有积水。

(2)应带有安全保护装置,以保证分接开关的安全运行。当油室内压力异常升高时,为使油室不被破坏,需有与油室机构强度相适应的放压阀或过压释放装置。

(3)必须有良好的机械强度,以承担放压阀释放时所产生的破坏压力。

(4)在结构上应供给有吸油和注油的接头以及放油塞,且设置排气孔,可放出由燃弧产生的气体。

(5)一般应带有单独的储油柜、吸湿器、安全气道、保护继电器等安全保护装置。油室若无单独的储油柜时,则应在油室上部装有指示油位的油表。

(6)油室的绝缘筒承担分接开关对地绝缘,为此,应具有良好的绝缘性能。

(7)结构简单,安装方便,且能灵活地适应连箱盖式和钟罩式结构的变压器的安装要求。

2.3.2 分接开关承受瞬时过电压保护措施

变压器正常运行时,分接开关级间绝缘距离上只承受一个级电压负荷,然而当雷电波进入变压器内部时,其级间上呈现瞬时过电压,可能危及分接开关运行。因此,为了对其控制,必须在级间绝缘距离上采取过电压保护措施。过电压的限制可采用火花放电间隙(M型分接开关)或ZnO压敏电阻(T或R型分接开关)来实现,详见图25-6所示。

2.3.3 电动机构

电动机构是有载分接开关变换操作位置的控制和传动装置。它安装在变压器油箱侧壁上,借助垂直传动轴、伞形齿轮传动箱和水平传动轴与分接开关联结在一起。

电动机构采用箱式结构,箱内装有操动分接开关所需的全部机械和电气部件,可供电动、手动、遥远电动和自动调压装置控制的操作。

电动机构应具有下述的技术要求:

(1)电动机构的控制应采用逐级控制原理,即操动分接开关从一个工作位置到另一个相邻工作位置,电动机构的动作由单一控制信号启动,而不受外界任何干扰和没有可能中断情况下完成该级的动作。在完成一级分接变换操作后,电动机构能可靠地停下来。

(2)电动机构应带有极限位置保护、手动操作安全保护、旋转方向保护、控制电压临时失压自

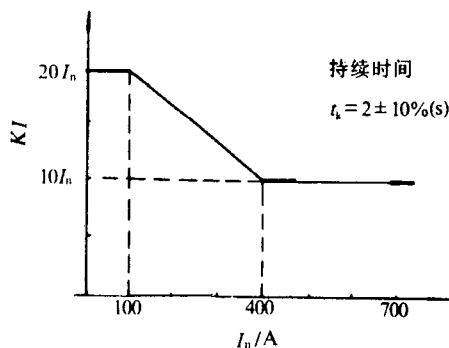


图 25-5 分接开关短路电流稳定值

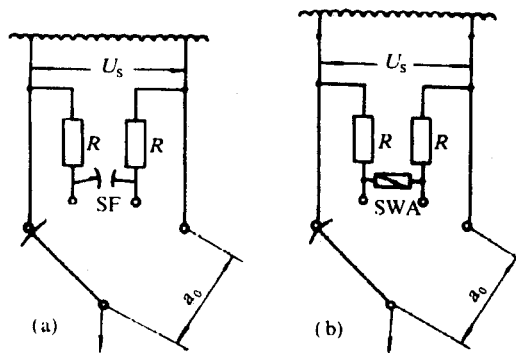


图 25-6 级间 α_0 过电压保护措施

(a) 火花间隙 SF (b) 压敏电阻 SWA

动再启动保护、紧急断开电源保护、防潮和低温加热等安全保护以及分接变换操作监视装置,确保运行安全可靠。

(3)电动机构应带有就地和遥远位置指示装置以及分接变换操作次数指示装置,所有指示应清晰、可靠和准确。

(4)电动机构应有输出转矩和手动操作转矩的要求。电动机构采用不同功率的电动机,以适用于任一分接开关及其组合的传动。手动操作转矩要求应满足操作者可以从容操作而无困难的条件,一般手动操作转矩不超过 $25\text{N}\cdot\text{m}$,偶然出现的最大转矩应不超过 $50\text{N}\cdot\text{m}$ 。

(5)电动机构箱体应符合户外设计的要求,具有防火(雨、雪)、防尘、防虫蚁的性能。

总之,电动机构应符合GB10230—88《有载分接开关》标准中有关电动机构的技术要求。

2.3.4 分接选择器

分接选择器是直接浸在变压器油箱内变换操作的。随着分接变换操作次数的增加,必定有机械摩擦的产物——磨屑进入变压器油中。这些磨屑很细,一部分可以长时漂浮在油中而不沉降。有些铁质的磨屑,甚至会被变压器绕组吸附,严重地影响变压器的绝缘性能。为此,要尽量限制磨屑的产生。采用必要的工艺措施和选用耐磨性较好的材料,力求减少磨屑。

为了减少级进传动机构的磨屑,往往采取两个有效措施:①用滚动摩擦替代滑动摩擦;②运动构件表面“硬化”处理,如氮化处理、表面淬火处理等。

为了减少分接选择触头滑动摩擦而产生磨屑,往往采取耐磨的有色金属材料配对,如铬锆铜板与棒配对,或银铜合金板(含银量2%)与硬紫铜棒配对。其次定触头表面采用镀硬银措施,提高表面镀层硬度(镀硬银 $\text{HV}=150\sim 180$,普通镀银 $\text{HV}=50\sim 60$,两者表面镀层硬度差三倍)。

第三节 试验项目及方法

1 分接开关外观检查

分接开关的外观检查采用目视检查,它包括下列项目:

- (1)零部件装配正确性的检查。
- (2)表面被覆质量的检查。
- (3)绝缘件外观检查。
- (4)紧固件紧固的检查。
- (5)标牌正确性的检查。
- (6)接线正确性的检查。
- (7)分接开关清洁性的检查。

1.1 零部件装配正确性的检查

分接开关零部件装配完成后,首先需要经过目测检查零部件装配的正确性。尤其需要按分接开关整定工作位置表检查各部件相互安装位置是否正确,有无错装或少装零件的情况。目视检查分接开关有无存在影响质量的损伤、碰伤等缺陷,各运动部件的相对运动是否灵活,有无卡滞现象。

1.2 表面被覆质量的检查

为了防止金属的腐蚀,分接开关的各种金属零件的表面都要采用被覆处理,常用有电镀、发黑和喷漆等方法。此外,有的金属零件为了提高电气性能,表面采用环氧涂敷。上述表面被覆处理的质量要求不同,因而目视检查方式也相应不同。

1.2.1 金属镀层

金属镀层着重检查镀层和基本金属结合是否牢固,有无镀层的剥落;镀层结构是否细致紧密,有无裂纹、麻点、气泡等缺陷;镀层厚度是否均匀一致,色泽是否光亮等。

1.2.2 发黑处理

在分接开关中,黑色金属防蚀另一措施是采用化学处理方法使其表面发黑。发黑处理比电镀工艺简单,价格低廉,防蚀效果较佳。但它受空气中潮气影响甚大,且防蚀时间较镀层短。因此,它不适用于暴露在空气中的黑色金属的防蚀,仅作为浸在变压器油中的黑色金属的暂时防蚀措施。采用发黑处理的零件在装配时应注意它的防蚀效果,一旦发现防蚀失效,零件必须重新进行发黑处理。

1.2.3 喷漆涂敷

喷漆涂敷在零部件表面形成一层附着牢固、坚实、柔韧的涂膜,起到保护、装饰、标志及其特殊要求的作用。尤其要注意检查装饰的颜色是否一致,有无漆层脱落等缺陷。

1.2.4 环氧涂敷

环氧涂敷是指特定的零件表面的涂敷处理,目的是为了提高分接开关绝缘强度。因而,环氧涂敷应附着牢固坚实,不应出现剥落现象。

1.3 绝缘件外观检查

在分接开关中通常采用绝缘件不外乎有模塑成型或层压材料加工成型两种。模塑成型绝缘件着重检查毛刺废边是否去净。层压材料加工成型绝缘件应检查表面加工精度,加工面是否有开裂、分层等缺陷以及绝缘浸漆处理有无气泡,表面是否光滑平整,有无沾灰、漏漆、麻点或漆堆严重等缺陷。如果该绝缘件带有均压措施时,还应检查均压零件表面光洁度。

1.4 紧固件紧固的检查

对于电阻过渡高速转换的分接开关,紧固件锁固与否直接影响工作可靠性。因此,紧固件锁固都应采取必要的防止松退措施。这些措施有:

(1)螺母紧固一般采用自锁螺母。螺栓或螺钉的螺纹必须穿出自锁螺母一至两个螺距。

(2)采用六角头螺钉或六角螺母紧固时需带有止退垫片,紧固后止退垫片翻起 90° ,紧紧锁在六角平面上,防止松退。

(3)沉头螺钉紧固时,在其边缘槽口处冲铆防退。

(4)绝缘件紧固时,采用碟形弹簧组合使用,来防止干燥收缩的松退。

(5)一般尽量少采用弹簧垫圈作为防松措施。确实需要时,要加套圈防护或在沉孔中使用。

紧固件紧固的检查主要是上述防松退措施是否落实,有无松退现象。尤其要注意干燥处理后紧固件锁固可靠性。

1.5 标牌正确性的检查

分接开关各部件装配后,应检查标牌上的技术参数的正确性。同时着重检查所有部件的出厂编号的一致性。尤其对于方向指示和位置指示应清晰无误。

1.6 接线正确性的检查

接线正确性的检查主要是过渡电阻接线方式和电动机构的电气控制部分。这两个部分接线一旦错误,可能导致分接开关工作失误。此外,接线应整齐美观,排列均匀。

1.7 分接开关清洁性的检查

分接开关清洁性的检查是外观检查的一个重要内容。分接开关应干净整洁,无屑末灰尘,更不能沾有金属屑末而影响绝缘性能。分接开关出厂前,需进行热油冲洗,以保持供货时清洁性。

2 触头参数的测量

触头参数的测量包括触头接触压力、超程和开距的测量。触头的接触压力关系到它的发热、熔

焊和电磨损,必须加以控制。因此,必须测量无励磁分接开关和有载分接开关及其相应部件的切换开关、分接选择器或选择开关每个触头的接触压力。

触头接触压力的测量可用弹簧秤或砝码测量,也可以用专用测压计测量。用弹簧秤或砝码缓缓地把被试触头拉开或压开。触头的最小接触压力是以触头串联的讯号灯开始熄灭或以塞入动、定触头厚度小于0.1mm的塞片开始自由活动为依据。外加的力应与触头的压力方向一致。如果一个触头有几个弹簧,则外加力的方向与几个弹簧的合力方向一致。

对于并联触头,应分别测量各个触头的接触压力。如果分接开关总装后,不可能实测触头接触压力,允许在分接开关装配前进行触头接触压力的测量,或者按弹簧实际压缩或拉伸尺寸测得力及着力点到支点的实测距离进行计算,以确定触头的接触压力。

对于夹片式触头结构,往往采用图25-7测量方法。此时测力计测量出的力需按下式折算为触头接触压力。

$$F = F_{\text{测}} \frac{a}{b} \quad (25-1)$$

若b点选在紧靠定触头时,则可不必折算。

对于对开式触头结构,首先应测量超额行程,然后用测力计测量触头弹簧在被压缩或拉伸同一量值(超额行程)的力作为触头接触压力,如图25-8所示。

对于滚转接触的触头结构,往往将滚转动触头压缩到实际与定触头接触的尺寸(如图25-9中 $\phi 343$ 尺寸)时测得的力作为触头的接触压力。

触头接触压力也可以用专用测压计进行测量。此时则把被测量的力化为电量或仪表的量程来显示。此类专用测量装置必须经常进行计量的验证,以保证触头接触压力测量的准确性。

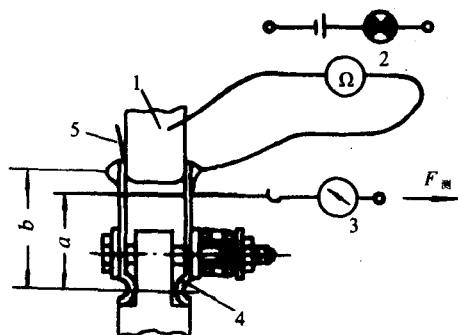


图25-7 夹片式触头接触压力的测量

- 1—定触头 2—欧姆表或信号灯(2.5V)加电池(3V)
3—测力计(100N弹簧秤) 4—动触头 5—0.10mm
电缆纸

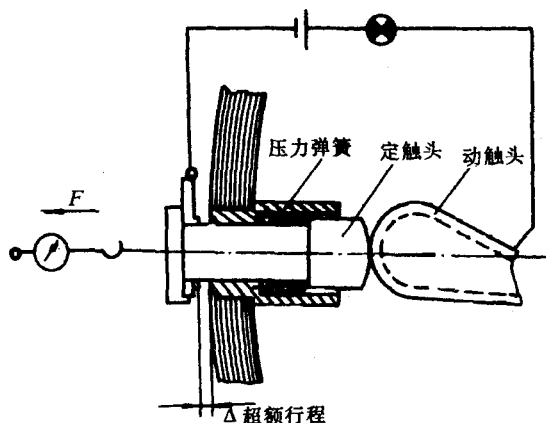


图25-8 对开式触头接触压力测量

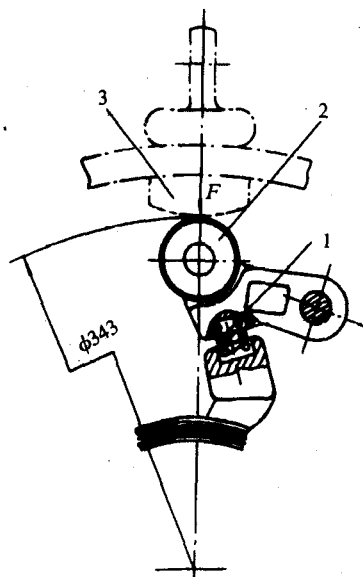


图25-9 滚转触头接触压力的测量

- 1—压缩弹簧 2—动滚柱触头 3—定触头

触头接触压力按上述三次测量的算术平均值,即每测量一次,触头必须切换三次。各次测量的偏差不应超过平均值的 $\pm 10\%$ 。触头的接触压力及其允许偏差在图纸或相应的技术条件中已有规定,并能进行中间检查。

电弧触头的开距(包括程序断口开距和机械断口开距)影响它的灭弧可靠与否,必须加以控制。因此,型式试验的分接开关,则应测量此参数。它可以直接用尺、卡尺、内卡钳或样板来测量。至于例行试验时,则可从触头变换示波图时间参数的测量间接地判断开距是否符合要求。

3 导电回路电阻测量

分接开关导电回路电阻的测量包括触头接触电阻、分接开关及其主要部件(切换开关、分接选择器、转换选择器)等导电回路直流电阻和过渡电阻器回路电阻的测量。

3.1 触头接触电阻的测量

触头系统按其工作任务可分为载流触头和电弧触头两大类。分接选择器的触头系统是按其承载电流而设计,不能用来接通及开断电路,因而它们实质上是一组载流触头。切换开关触头系统承担负载电流的承载和转换任务。因而,它们往往需要两组触头:一组高电导系数的触头,这是通过长期工作电流所必需的载流触头,如切换开关主触头和联结触头;而另一组触头是由难熔材料组成,用于减少在电弧燃烧及开断过程中磨损的电弧触头,如切换开关主要通断触头和过渡触头。对于小容量的选择开关,则往往把载流触头和电弧触头组合一体构成所谓复合式分接开关。

3.1.1 接触电阻的物理现象

当两个金属导体互相接触时,在接触区域内存在着一个附加电阻称为接触电阻。接触电阻是电接触中客观存在的重要的物理现象之一。

为了说明接触电阻的性质,我们首先来分析一个简单的现象。在图25-10(a)中画了一段导体,导体内通以电流 I 时,用电压表可测出导体上一小段 l 的电压降为 U_l ,这一小段导体的电阻 R_l 为 U_l 与 I 之比,即

$$R_l = \frac{U_l}{I} \quad (25-2)$$

如果将此导体切成两半,然后再合起来形成电接触,如图25-10(b)所示。在导体内仍通以电流 I ,这时再用电压表测量同样长度的该小段导体的电压降 U_l ,就会发现 U_l 比 U_l 大得多。用 U_l 与 I 之比求得的电阻 R_l ,即

$$R_l = \frac{U_l}{I} \quad (25-3)$$

也将比 R_l 大很多。经过分析比较发现,经切成两半的导体的电阻 R_l ,除包含有该段导体的固有电阻 R_l 外,还增加了某一附加电阻 R_j ,即

$$R_l = R_l + R_j \quad (25-4)$$

我们称此附加电阻 R_j 为接触电阻。

为什么切成两半导体的接触区域会产生一个附加的接触电阻呢?原因有两个方面:第一,由于切面(接触面)表面凹凸不平,金属实际接触面减小了,即电流通过的面积缩小了,也就是说,电流线在接触面附近发生了严重的收缩现象;第二,接触面在空气中可能迅速形成一层薄膜(如氧化膜等)附着于表面,也使电阻增大了。因此,接触电阻是由收缩电阻 R_c 和表面膜电阻 R_b 两部分组成的。

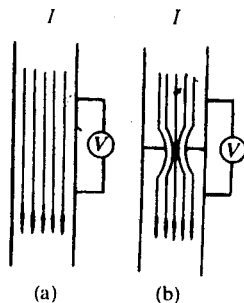


图25-10 接触电阻
(a)导体电阻 (b)接触电阻

其表达式为:

$$R_j = R_c + R_b \quad (25-5)$$

下面分别讨论这两部分电阻的性质。

3.1.1.1 收缩电阻 R_c

当动、定两个触头的表面接触在一起时,机械接触面积只是触头视在面积中很小一部分。由于接触表面不可能是理想的平面,客观上或多或少存在着波纹起伏。所以,接触表面只有若干小的突起部分相互接触。这些相互接触的小突起部分称为接触点。

电流经过接触区域时,从尺寸较大视在面积转入截面很小的接触点,在此情况下,电流线发生剧烈的收缩效应,如图25-11所示。这种收缩效应所呈现的附加电阻即为收缩电阻。由于接触点数目不止一个,所以,整个接触处的收缩电阻为各接触点收缩电阻的并联值。

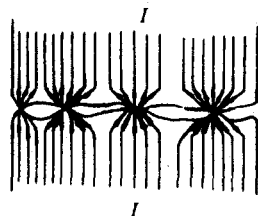


图25-11 电流收缩现象

收缩效应决定着触头载流能力,同时还在很大程度上决定着触头电动斥力的大小。当短路电流很大时,电动斥力会使接触部分互相排斥开来。由于这一现象常常会形成严重电弧,使触头严重烧损,并有可能使触头熔焊。

在触点发生弹性变形时,根据Holm(霍姆)电流场理论可以算出一个触点的收缩电阻为

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (25-6)$$

式中 ρ ——材料电阻率, $\Omega \cdot m$;

a ——触点接触处的圆面半径, m 。

在一个触点时,材料处于弹性变形的触点接触,因而半径为

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} F \left(\frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2} \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - 1} \quad (25-7)$$

式中 F ——触点接触压力, N ;

γ_1, γ_2 ——触点1和触点2的泊松系数, $\gamma_{Cu}=0.3, \gamma_{Ag}=0.35$;

E_1, E_2 ——触点1和触点2的弹性模量, $E_{Cu}=10^5 MPa, E_{Ag}=0.81 \times 10^5 MPa$;

r_1, r_2 ——触点1和触点2的曲率半径, m 。

触点发生塑性变形时, n 个接触点的接触面

$$n\pi a^2 = \frac{F}{\epsilon \cdot HB} \quad (25-8)$$

式中 F ——触点接触压力, N ;

ϵ ——与触点材料变形的有系数;

HB ——触点材料的布氏硬度, N/m^2 。

把式(25-8)代入式(25-6)得

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot \epsilon \cdot HB}{nF}} \quad (25-9)$$

由此可知,触点收缩电阻随着接触压力增加而减少。

3.1.1.2 膜电阻

在触头接触点附近,由于污染覆盖一层导电性很差的表面薄膜,由此形成的接触电阻称为膜

电阻。

触头接触时,其导电性能取决于表面膜的厚度和性质。在没有污染的空气中,金属表面实际上只生成氧化膜。金属表面加工后就立即开始氧化过程。在触头接触时,当氧扩散进入凸起小点的接触部位时发生氧化效应,形成氧化薄膜,导致接触处导电质点的数目与大小逐渐减少,因此,氧化膜是触头工作退化的关键原因。图25-12示出在室温条件下暴露在干燥空气中的铝、铁、铜和银表面上氧化膜增长与时间的关系,其曲线形状符合反对数律。

当空气被硫或氯或这些元素的化合物(例如 SO_2 和 H_2S)污染时,在金属表面也会形成硫化物和氯化物。此时发生物理过程原则上与氧化膜形成时物理过程一致。

金属表面由于化学腐蚀作用所形成各种化合物的薄膜取决于金属接触材料的化学和电化学性质,并与介质温度和环境条件有密切的关系。例如用金、铂贵金属制成触头,其金属表面不易形成金属化合物薄膜。银在常温下生成厚度为 $(20\sim30)\times 10^{-10}\text{m}$ 的 Ag_2O 膜,导电性能的降低并不明显;当温度超过 180°C 时, Ag_2O 即行分解。因此,银的氧化膜形成膜电阻对接触电阻的稳定性影响甚小。而银的硫化物形成膜电阻导电性差,对电接触的危害大。铜和铜合金具有良好的导电性能,但是铜的金属表面很容易形成厚度较大的、导电率很小的 Cu_2O 膜。此膜随温度升高,厚度迅速增加,接触电阻成千倍地增大,严重地威胁触头导电性能。

在分接开关中,接触元件除暴露在空气中或绝缘气体中外,也常被置于绝缘油中。此时,触头上也同样形成表面薄膜,它与材料、温度和时间有关。图25-13示出绝缘油中的铜、银、黄铜圆导体在通过发热后表面膜增长的情况,表面膜增长曲线形状与空气中氧化膜增长类似。另外,对于浸在油中的触头来说,在温度相当低的情况下(约 150°C),绝缘油就会发生碳化,于是在触头之间就沉积着油碳粒子,使接触电阻显著升高;此外,由此产生的反接触力,有可能使触头金属连接断开。尤其值得注意的是,绝缘油中使用的触头会出现一种特殊形式的污染薄膜。这一后果

是由在这些接触表面上逐渐形成绝缘的暗色薄膜所造成。它不断地使个别的接触点丧失载流能力,而且导致工作温度稳定增加。但是在开始时增加却很缓慢。由于薄膜的生长速度、工作温度以及接触点数目存在重要敏感性的接触电阻之间的指数变化关系,在开始阶段,接触电阻的变化关系是觉察不到的,但是,在适当的时间后,一旦接触区的面积减少到某一临界值时,以后面积再继续减少,接触电阻就会急剧增加,如图25-14所示。

为了恢复触头良好导电性能,防止接触电阻脱离控制出现急剧增大的后果,除需要较低的工作温度以及选用对在油中形成暗色薄膜不会产生催化作用的触头材料外,用机械力把膜压碎或通过触点接触表面产生相对运动,如滑动摩擦把膜弄破。所以在测量触头接触电阻前分接开关要先

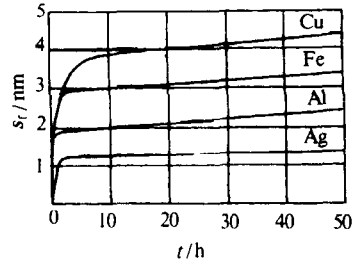


图25-12 空气中各种金属氧化膜的增长

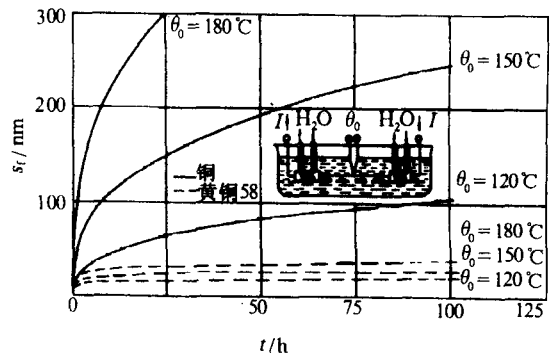


图25-13 放置在绝缘油中的铜棒和黄铜棒在不同表面温度下表面膜的增长情况

转动数次。也可以提高触头上电压,将膜击穿。 Cu_2O 膜击穿场强为 $0.35 \times 10^8 \text{V/m}$,如膜厚度为 $5 \times 10^{-7} \text{m}$,至少要加17.5V的电压,膜才被击穿而导电。

3.1.2 接触电阻的测量

用电桥法或压降法测量触头的接触电阻。测量引线应分别接到临近被测量触头的两边。在变压器油中工作的触头,测量前应采用该油清洗。

用压降法测量触头接触电阻时,接触电阻与测量温度有关,因此测量电流不宜过大。此时,所加电流最大不超过分接开关最大额定电流的1/3。

GB10230—1988《有载分接开关》中规定,触头在1.2倍最大额定通过电流下对油温升 $\leq 20\text{K}$ 。触头通以1/3最大额定通过电流时温升约为 $\tau \leq \left(\frac{0.33}{1.2}\right)^{1.6} \times 20 = 2.5\text{K}$ 。式中指数1.6是考虑触头对油温升与损耗0.8次方成正比缘故。这么低的温升对测量触头的接触电阻影响不大。

由于触点有膜电阻的存在,因此,测试触头接触电阻前,被测试触头至少动作5次以上,方可进行接触电阻的测量。

取3次或3次以上测量出最大接触电阻为接触电阻的极限值。触头接触电阻极限允许值应规定在相应的技术文件中。一般情况下,触头每点接触的接触电阻应不大于 $350\mu\Omega$,多点接触的触点,其接触电阻应低于多点并联阻值 $350\mu\Omega/n$ (n 为并联点数)的要求。

触头接触电阻的各测量值与全部测量的算术平均值,其偏差不得超过 $\pm 30\%$ 的要求。

3.2 导电回路直流电阻的测量

分接开关及其主要部件(切换开关、分接选择器、转换选择器)等导电回路中有若干串、并联触头,其总装后或组装后不可能单独测量每个触头的接触电阻时,则允许测量串、并联触头的导电回路的直流电阻。从而判断触头接触是否良好。

对于抽出式结构的分接开关,应分别测量开关本体及其插入油室后总的回路直流电阻,见图25-15,从而判断开关的联结触头是否接触可靠、良好。

在图25-15中,首先测量开关本体的导电回路直流电阻(U_1U 、 V_1V 、 W_1W 和 U_2U 、 V_2V 、 W_2W 回路)为 R_{U_1U} 、 R_{V_1V} 、 R_{W_1W} 和 R_{U_2U} 、 R_{V_2V} 、 R_{W_2W} 的值,其次测量开关本体插入油室后的导电回路直流电阻为 $R_{U_1'U'}$ 、 $R_{V_1'V'}$ 、 $R_{W_1'W'}$ 和 $R_{U_2'U'}$ 、 $R_{V_2'V'}$ 、 $R_{W_2'W'}$ 的值。通过其测量导电回路直流电阻值,简易估算出联结触头 U_1U_1' 、 V_1V_1' 、 W_1W_1' 、 U_2U_2' 、 V_2V_2' 、 W_2W_2' 、 U' 、 V' 、 W' 的接触电阻值,即

$$R_{U_1U_1'} = \frac{R_{U_1'U'} - R_{U_1U}}{2} \quad (25-10)$$

$$R_{UU'} = \frac{R_{U_1'U'} - R_{U_1U}}{2} \text{ 或 } R_{UU'} = \frac{R_{U_2'U'} - R_{U_2U}}{2} \quad (25-11)$$

式(25-11)中,两个 $R_{UU'}$ 值中取较大值作为联结触头 UU' 的接触电阻值。其他的联结触头接触电阻估算同式(25-10)和式(25-11)类似。

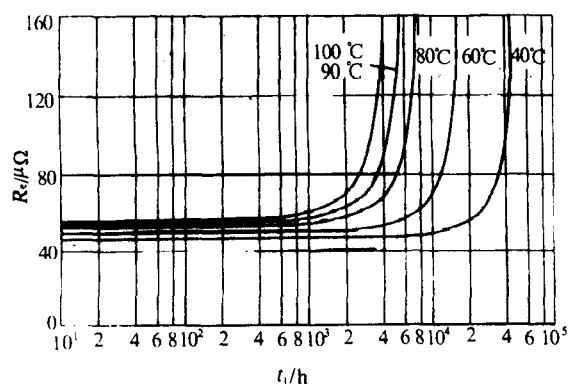


图25-14 油中铜-铜触头的接触电阻 R_c 的不稳定情况,它是触头温度与负荷持续时间的函数

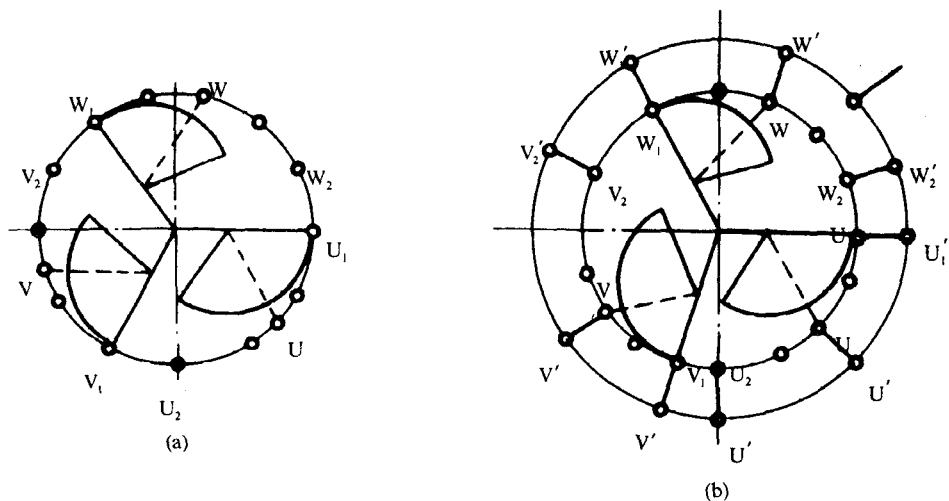


图25-15 抽出式结构分接开关导电回路直流电阻的测量

(a)开关本体 (b)本体插入油室后

通过上述的估算,可以判断出联结触头接触状况。

对于分接选择器,则应在分接选择器的任一分接位置和导电环引出导线末端X、Y、Z点之间的导电回路上测量直流电阻,如图25-16所示。其触头接触电阻为测量值的1/2。转换选择器则在“K”、“-”和“K”、“+”之间回路测量,触头接触电阻也为测量值的1/2。由此可以判断分接选择器的触头接触状况。

导电回路直流电阻测量方法与触头接触电阻测量方法完全相同。取3次或3次以上测量出最大电阻值为导电回路电阻的极限值。该值一般在相应的技术文件中规定。

导电回路电阻各测量值与全部测量算术平均值,其偏差不得超过下述要求:

- (1)分接选择器、转换选择器和切换开关
有一个触头串联, $\pm 25\%$ 。
有两个或多个触头串联, $\pm 30\%$ 。
- (2)整个分接开关, $\pm 20\%$

3.3 过渡电阻器回路电阻的测量

用电桥或万用表测量过渡电阻器回路电阻,即过渡电阻值。对于采用电阻分流并联双断口过渡电路,应测量每一分支电路的阻值及并联的总阻值。取三次测量的算术平均值为过渡电阻的阻值。其算术平均值与各次测量值的偏差不大于3%。过渡电阻的实测值与匹配值(铭牌上数值),两者之间 $\pm 10\%$ 误差是允许的。

4 转动力矩测量

4.1 转动力矩的要求

无励磁分接开关按JB/T 8637—1997标准规定转动力矩应符合表25-2要求。

有载分接开关及其电动机构按相应的技术条件规定,具体要求详见表25-8、表25-9和表25-10的规定。

4.2 转动力矩的测量

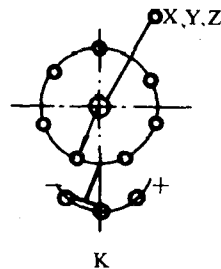


图25-16 分接选择器导电回路电阻测量

表 25-8 分接开关的转动力矩

开关型号	规格	切换开关 /N·m	分接选择器动触头/N·m			级性变换器 随动/N·m	所占比例 /%
			离开定触头	进入中间位置	进入相邻定触头		
ZY1A (M)	I 500	<30	≤60	≤20	≤40	≤100	40
	I 800	<35	≤105	≤35	≤70	≤175	70
	Ⅲ 500	<40	≤150	≤50	≤100	≤250	100
	I 1200						
ZY15 (Ms)	I 300	<30	≤14		≤14	≤32	40
	Ⅲ 300	<40	≤35		≤35	≤80	100

表 25-9 复合式分接开关的转动力矩

开关型号	规格	选择开关/N·m	极性变换器随动/N·m	所占比例/%
FY30(V)	I 350/Y-Δ	<10	<25	40
	Ⅲ 350/Y-Δ	<20	<60	100
	I 500/Y-Δ	<15	<30	40
	Ⅲ 500/Y-Δ	<30	<65	100

表 25-10 电动机构的转动力矩

电动机型号		DCJ30	DCJ10/DCJ20				DJC20
电动机 额定 参数	功率/kW	0.37	0.37	0.75	1.1	2.2	3.0
	电压/V	三相 380/220					
	电流/A	1.95/1.1	1.95/1.1	3.4/2.0	5.0/2.8	8.0/4.4	11.6/6.5
	频率/Hz	50					
	同步转速/r·min	1500					
变换操作一次传动轴转数		2	33				
变换操作一次传动时间/s		2.5	约 5.3				
传动轴上输出转矩/N·m		45	9	18	26	52	70
变换操作一次手柄转数		30	33			54	

分接开关转动力矩可以从电动机构手柄处测量,也可以在分接开关主要部件上进行测量。它可采用间接法、扭转计法、示波法和电流法等测量方法。

采用间接法测量转动力矩时,将弹簧秤勾住电动机构手柄,并按与柄臂垂直方向加力,用测量的力 P 乘以臂长 L ,计算出转动力矩 M 。

扭转计法测量转动力矩,就是采用可调式扳手来测量转动力矩。扳手所显示的数值,就是转动力矩的测量值。

示波法测量转动力矩,就是采用扭矩测量仪。它把所测转动力矩值化为电量,用示波记录下来。这种测量方法能准确反映出分接开关触头动作瞬间其转矩变化状况,并能记录出现的最大转矩值及其相应位置。

电流法测量转动力矩,就是测量电动机构中电动机定子电流,间接换算为转矩测量值。分接开关转动力矩值,应规定在相应的技术文件中。

转矩测量时,应在正反两个转动方向上至少测量三次。每个方面上的三次测量平均值可认为是该方向的转动力矩值。三次测量中各次测量结果和两个方向上测量平均值的偏差均应不大于20%。

值得一提的是组合式分接开关,其转动力矩主要体现在分接选择器上。因此,要测量分接选择器动触头离开或进入定触头以及转换选择器随同分接选择器动作的最大转矩及相应位置。

5 触头动作顺序的测量

触头动作顺序是分接开关的重要技术参数之一。对于每一特定分接开关、触头动作顺序必定有一定的技术要求。人们可以通过对各对触头动作顺序的检验来判断分接开关动作的正确性和可靠性。并在与技术要求不符时进行调整。

无励磁分接开关是按承载电流,但不接通和不开断电流设计的装置。因此,它相当于有载分接开关的分接选择器。其触头动作顺序测量可参照分接选择器类似测量方法。有载分接开关总装后,操作一个循环,测量每个分接变换的动作顺序。组合式分接开关要测量分接选择器、转换选择器和切换开关三者相配合的动作顺序,还要单独测量切换开关触头变换程序。

复合式分接开关要测量选择开关触头变换程序和选择开关与转换选择器相配合的动作顺序。

如果分接开关带有电位开关的话,还要测量电位开关与转换选择器相配合的动作顺序。

5.1 触头变换程序的测量

分接开关采用过渡电路的原理实现分接变换操作。按其过渡电路的过渡电阻的数目有单电阻、双电阻、四电阻或多电阻过渡;按其触头变换程序有“1-2-1”、“2-3-2”或者更复杂的变换程序;按其触头断口数目有单断口、双断口等等。上述各种组合构成各式各样的过渡电路。但是根据其分接变换操作法归纳起来有旗循环、对称尖旗循环以及非对称尖旗循环操作法三大类。

旗循环是一种实现分接变换的操作法。在这一循环中,主通断触头于循环电流开始流过前断开通过的电流。

对称尖旗循环是一种实现分接变换的操作法。在这一循环中,主通断触头于循环电流开始流过后断开通过的电流。

非对称尖旗循环也是一种实现分接变换的操作法。在这个循环中,当开关转向一个方向时,主通断触头于循环电流开始流过前断开通过的电流;而开关转向另一个方向时,主通断触头于循环电流开始流过后断开通过的电流。

触头快速变换程序通常采用示波检示法来表示。它用于分接开关切换机构触头变换程序的出厂检查。由于切换机构触头上串有示波器振子,从而可拍摄触头的变换动作示波图。

对于不同结构的切换机构,触头变换程序、检示电路及其典型示波图都不相同。

5.1.1 双电阻过渡旗循环的切换开关

双电阻过渡旗循环切换开关的触头变换程序、直流检示电路及其典型示波图见图25-17。在图25-17(b)中,切换时程 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t 的值应在有关的技术文件中规定。一般说来, t_1 、 t_2 是主通断触头和过渡触头用来熄弧的时间,它们的值应大于 $\frac{1.2}{2f}$ (s),以保证可靠地熄弧(其中 f 为交流频率)。 t_3 是过渡触头桥接时间,采用尾推补偿法,桥接时间较短。 t 是总的切换时程一般其值为40ms~50ms。

5.1.2 四电阻过渡旗循环切换开关

四电阻过渡旗循环切换开关的触头变换程序、直流检示电路及其典型示波图见图25-18。在图25-18(b)中,切换时程 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 和 t 的值应在有关的技术文件中规定。通常 t_1 、 t_2 、 t_3 的值应大于 $\frac{1.2}{2f}$ (s),总的切换时程约为60ms。

5.1.3 双电阻过渡旗循环的选择开关

(1) 分开型结构的选择开关[FY30(V)型]

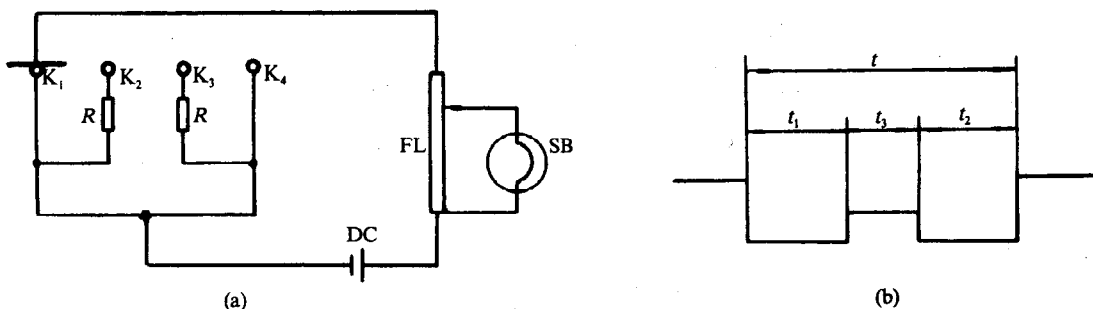


图25-17 双电阻过渡旗循环切换开关直流检示电路及典型示波图

(a) 直流检示电路 (b) 典型示波图

K_1, K_4 —主通断触头 K_2, K_3 —过渡触头 R —过渡电阻 DC —直流电源 FL —分流器 SB —示波器检流计 t_1 —主通断触头切换时程 t_3 —过渡触头桥接时程 t_2 —过渡触头切换时程 t —总的切换时程

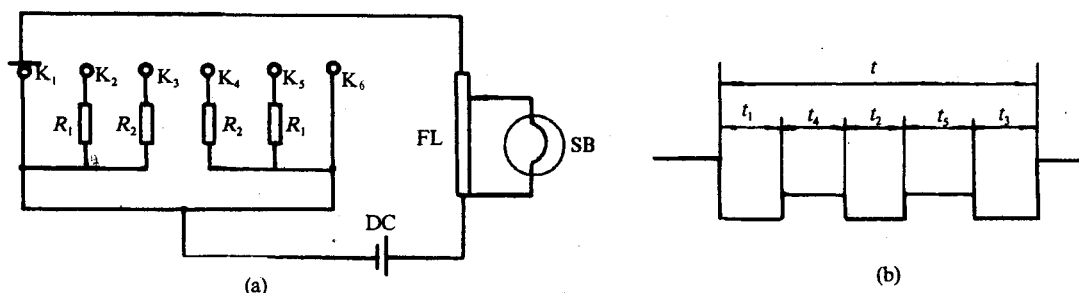


图25-18 四电阻过渡旗循环切换开关直流检示电路及典型示波图

(a) 直流检示电路 (b) 典型示波图

K_1, K_6 —主通断触头 K_2, K_3, K_4, K_5 —过渡触头 R_1, R_2 —过渡电阻 DC —直接电源 FL —分流器 SB —示波器检流计 t_1 —主通断触头切换时程 t_4 —过渡触头 K_2, K_3, K_4 切换时程 t_2 —过渡触头 K_2 或 K_3 切换时程 t_5 —过渡触头 K_3, K_4, K_5 切换时程 t_3 —过渡触头 K_3 或 K_4 切换时程 t —总的切换时程

双电阻过渡旗循环的分开型选择开关的触头变换程序、直流检示电路及其典型示波图见图25-19。

在图25-19(b)中,切换时程 t_1, t_2, t_3 和 t 的值应在有关的技术文件中规定。通常 t_1, t_2 值应大于 $\frac{1.2}{2f}$ (s)。

(2) 简易型结构的选择开关

双电阻过渡旗循环的简易型选择开关的触头变换程序、直流检示电路及其典型示波图见图25-20。

5.1.4 单电阻过渡非对称尖旗循环的选择开关

单电阻过渡非对称尖旗循环选择开关的直流检示电路及其典型示波图见图25-21。在图25-21中, t_2 和 t 的值应在有关的技术文件中规定。

在直流检示触头变换程序的试验中应注意下述几个问题:

5.1.4.1 检示振子及示波速度的选择

为了可靠地记录切换机构的触头变换程序的过渡过程,检示振子的固有频率需要超过触头过

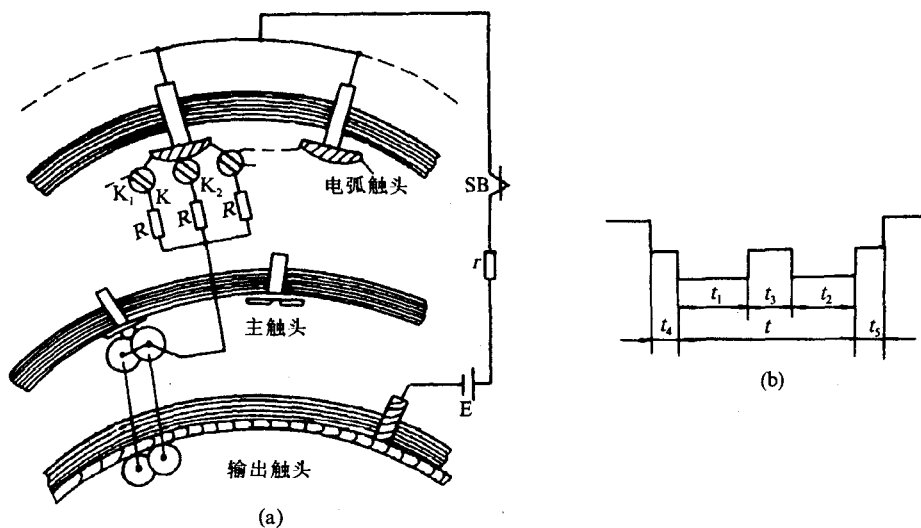


图25-19 双电阻过渡旗循环分开型选择开关直流检示电路及典型示波图

(a) 直流检示电路 (b) 典型示波图

K—主通断触头 K_1, K_2 —过渡触头 R —外接电阻 E —电源 r —调幅电阻 SB —示波器检流计 t_1 —主通断触头切换时程 t_2 —过渡触头切换时程 t_3 —过渡触头桥接时程 t_4 —主通断触头与过渡触头重叠时程 t_5 —主通断触头与另一过渡触头重叠时程 t —总切换时程

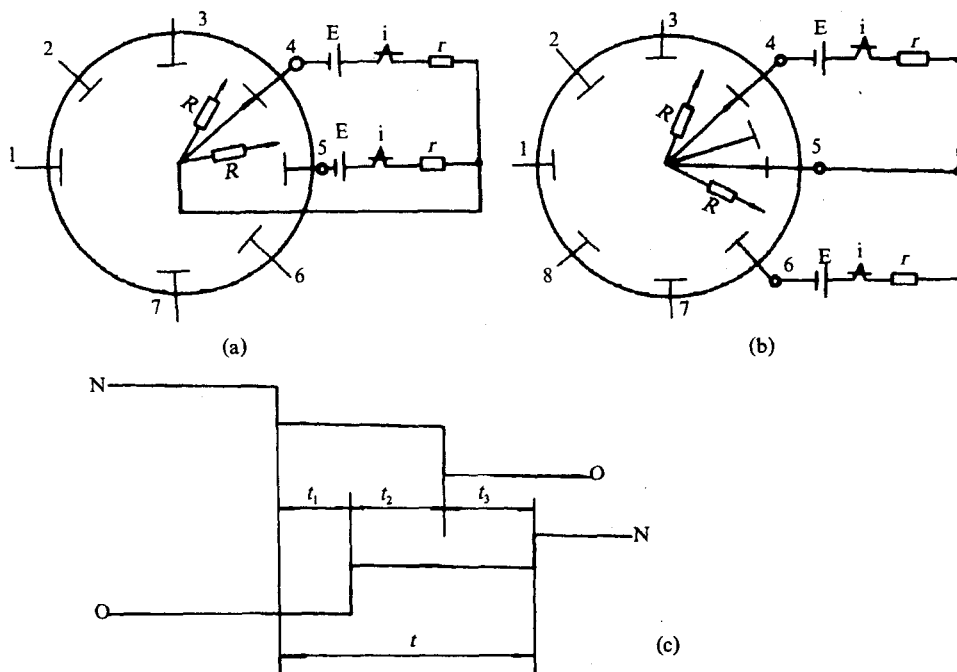


图25-20 双电阻过渡旗循环简易选择开关直流检示电路及典型示波图

(a) 中性点调压方式示波电路 (b) 中部调压方式示波电路 (c) 典型示波图

R —过渡电阻 E —直流电源 i —示波器振子 r —调幅电阻 t_1 —主通断触头切换时程 t_2 —过渡触头桥接时程 t_3 —过渡触头切换时程 $t=t_1+t_2+t_3$ 为总的切换时程

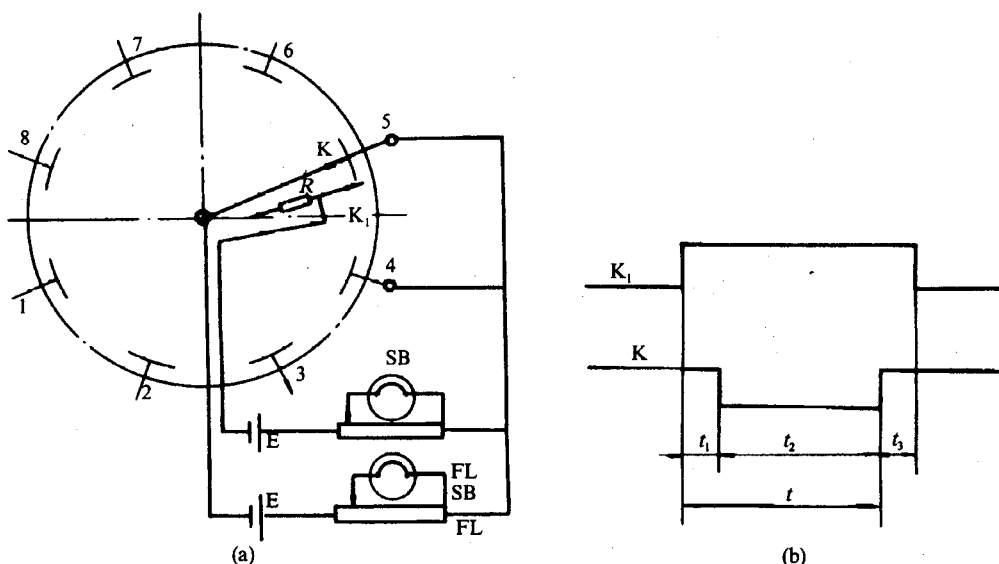


图25-21 单电阻过渡非对称尖旗循环选择开关直流检示电路及典型示波图

(a)直流检示电路 (b)典型示波图

t_1 —主通断触头与过渡触头桥接时程 t_2 —主通断触头(K)切换时程 t_3 —主通断触头与过渡触头同时接入分接的时程 t —总的切换时程

渡过程基本频率的3~5倍。由于切换机构触头振动频率通常为500Hz左右。因此,应选择检示振子的固有频率近于1 500Hz~2 500Hz。

为了节省相纸和便于判读触头变换过程示波图,示波速度通常取0.5m/s或1m/s为宜。

5.1.4.2 检示电路的电源电压的确定

检示电路的电压应取高些,便于检示触头的弹跳。反之,检示电压太低,会因触头间的油膜隔绝而出现示波图中断的现象。所以,建议采用直流为110V、220V或交流220V的检示电压。

为了消除油膜隔绝问题,除了提高检示电压使油膜电击穿外,往往在新加工触头表面采取人为措施刺破油膜。但随着分接开关切换次数增多,电弧触头表面逐渐烧蚀出现高低不平,这样,油膜隔绝问题也就自然消除了。这也是分接开关运行后,直流检示的示波图变好的原因。

5.1.4.3 示波图的判读

在判读检示的示波图中往往遇到时程判断、触头振动时间和触头开闭不同步时间的问题。在检示电路中,由于检示振子选取不当以及调幅电阻匹配不佳,可能拍摄出如图25-22的示波图。此时示波图上时程判断容易给人们造成错觉,正确的时程判断见图中所示。

无论直流检示或交流检示的示波图,为了判读触头变换时间和判断示波图波形是否中断,在示波检示中应有电流基准零线和时间基准波。触头的振动往往只发生在触头闭合瞬间。所以,在示波图中,触头闭合处的弹跳振动波形相应检示出来,如图25-23所示。触头振动允许时间应在有关的技术文件中规定,通常不大于4ms。

对于三相分接开关,各相触头开断不同步的时间一般不作考核。但是,三相分接开关各相触头并联起来作为单相分接开关使用时,其触头开断不同步允许时间也应在相应技术文件中规定,通常开断不同步允许时间为2ms~3ms,具体如图25-24所示。

5.1.4.4 根据示波电路的电源性质分为直流检示电路和交流检示电路两种

交流检示电路的电源电压可以高一点,它可以消除触头闭合时产生的微弱颤波。但交流示波

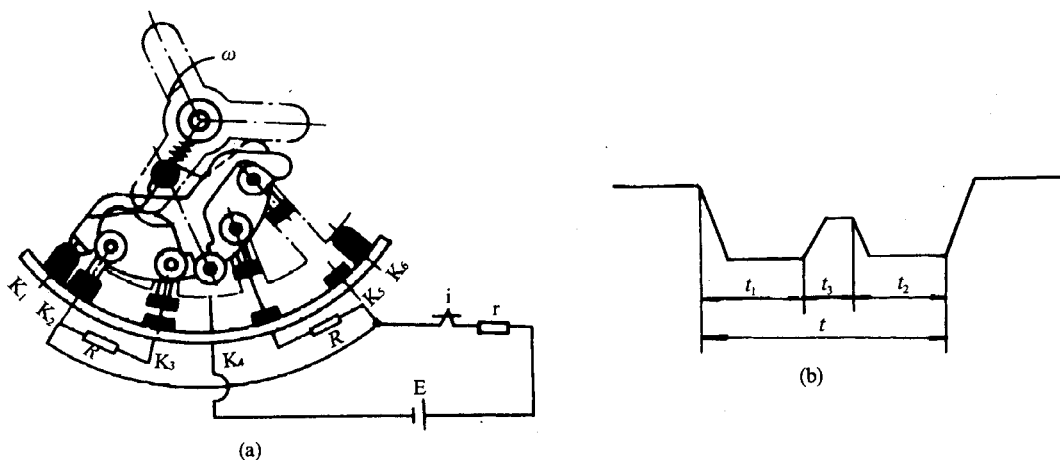


图25-22 双电阻过渡旗循环切换开关直流检示的示波图时程判断

(a) 直流检示电路 (b) 检示示波图判读

K_1, K_6 —主触头 K_2, K_5 —主通断触头 K_3, K_4 —过渡触头 E —直流电源 r —调幅电阻 i —示波器振子 t_1 —主通断触头切换时程 t_2 —过渡触头切换时程 t_3 —过渡触头桥接时程 t —总的切换时程

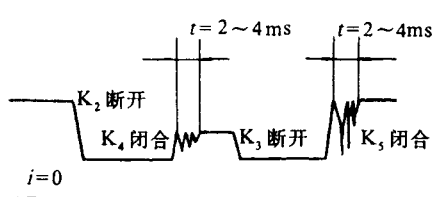


图25-23 触头闭合允许振动时间

的波形没有直流示波的波形直观，所以，许多分接开关生产厂家往往采用直流检示电路。

交流检示电路及典型示波图见图25-25所示。

5.1.4.5 切换时程与介质、介质温度的关系

同一切换机构处于不同介质之中的切换时程也是不同的。一般在空气介质中，切换时程要比油介质中切换过程短3ms~5ms(介质温度为20℃时)。但是有的切换机构却相反。具体分接开关可以在不同介质中拍摄触头变换程序示波图加以比较。

即使在相同的介质中，随着油温和黏度的不同，切换时程也发生相应变化。尤其在低温的油介质中，切换时程变化相当悬殊，如图25-26所示。

在图25-26中，以介质温度 $\theta=20^\circ\text{C}$ 时的切换时程为基准，随着油温的升高，切换时程基本上没有多大变化。在 $\theta=-25^\circ\text{C}$ 时，切换时程仅为基准的1.1倍。但在 $\theta<-25^\circ\text{C}$ 时，切换时程的倍数急骤地增加，这是油的黏度变大的缘故。尤其是变压器油中含有石蜡的成分，在低温下石蜡结晶增加切换机构的运动阻力。一般说来，只要变压器油不凝固，快速机构和切换机构是能够正常工作的，只仅仅切换时程变长而已。因此，切换时程的检查要规定油介质温度，通常不低于10℃。对于低温环境下投入使用

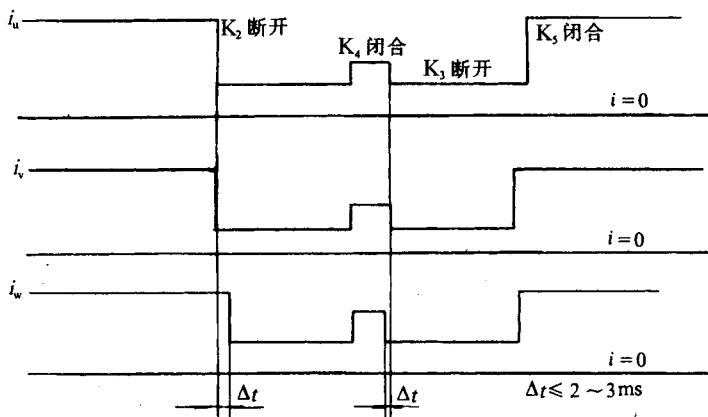


图25-24 双电阻过渡旗循环切换开关触头开断不同步允许时间

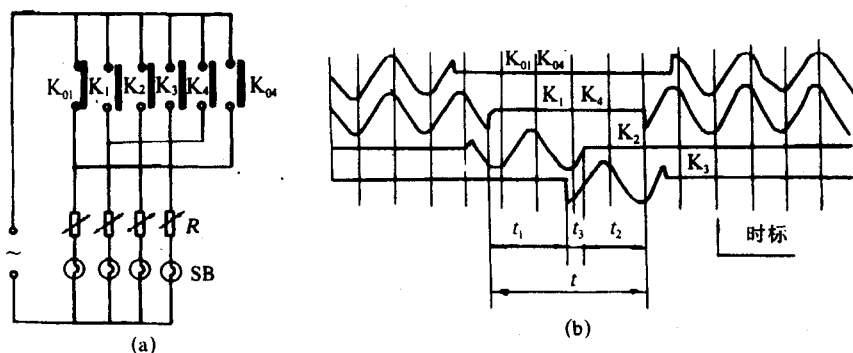


图 25-25 双电阻过渡旗循环法切换开关交流检示电路及典型示波图

(a)交流检示电路 (b)典型示波图

K_{01} 、 K_{04} —主触头 K_1 、 K_4 —主通断触头 K_2 、 K_3 —过渡触头 SB—示波器检流计

的分接开关,要采用凝固点更低的变压器油,例如国产25号或45号变压器油。

5.2 触头动作顺序的测量

分接开关触头动作顺序通常以程序表或程序图表示。采用程序表的表示法时,以开关中某一特定零部件(例如级进槽轮机构中的拨槽件)的转角(或电动机机构手柄转数)来表示各项触头动作顺序,见表25-11所示。采用程序图表示法时,必须绘出各项触头动作循环图(简称动作圆图),这时可用一特定零部件转角(或分接变换指示盘的转数)表示,如图25-27所示。

从触头动作顺序的圆图中可以看出,各项触头动作之间需有“间隔”,以保证触头动作顺序不发生错乱。

触头动作顺序中值得注意两个问题:一是分接选择器的动触头合上一相邻定触头与切换开关触头变换动作的配合“间隔”(或者转换选择器动触头合上一定触头与选择开关触头变换动作的配合“间隔”)必须严格控制 and 保证,决不容许两者动作顺序错乱,以免发生烧毁分接选择器事故;二是切换开关触头变换动作后必须留有剩余的“间隔”,以便多年运行之后,即使切换开关动作的程序略有变化也不至于发生电动机已经停车而尚未切换的事故。

触头动作顺序的确定通常可以采用目测法、响声法、指示灯法和示波法。

用目测法或响声法确定触头动作顺序比较直观,可以直接判断各触头动作情况。而采用指示灯法测量时,先按图25-28所示线路接线,手摇电动机机构进行分接变换操作。对于每个分接变换,注意观察灯光的亮、灭,并记录手柄的转数,从而可以确定分接选择器或转换选择器触头动作情况。

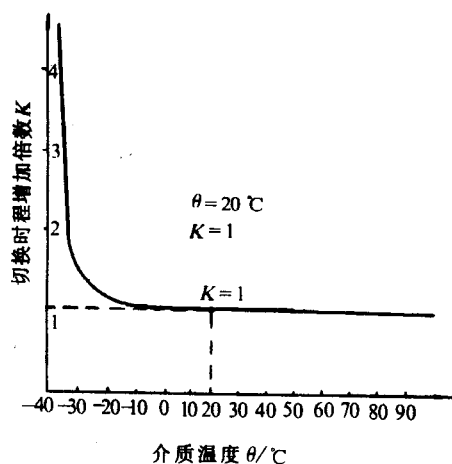


图 25-26 切换时程与油温的关系

表 25-11 触头动作顺序的程序表

动作部位技术要求		某部件的转角或转数
开始动作		
分接选择器	动触头离开定触头	
	动触头接触相邻触头	
	动触头合上	
转换选择器	动触头离开定触头	
	动触头接触相邻触头	
	动触头合上	
切换开关动作		
完成一级变换		

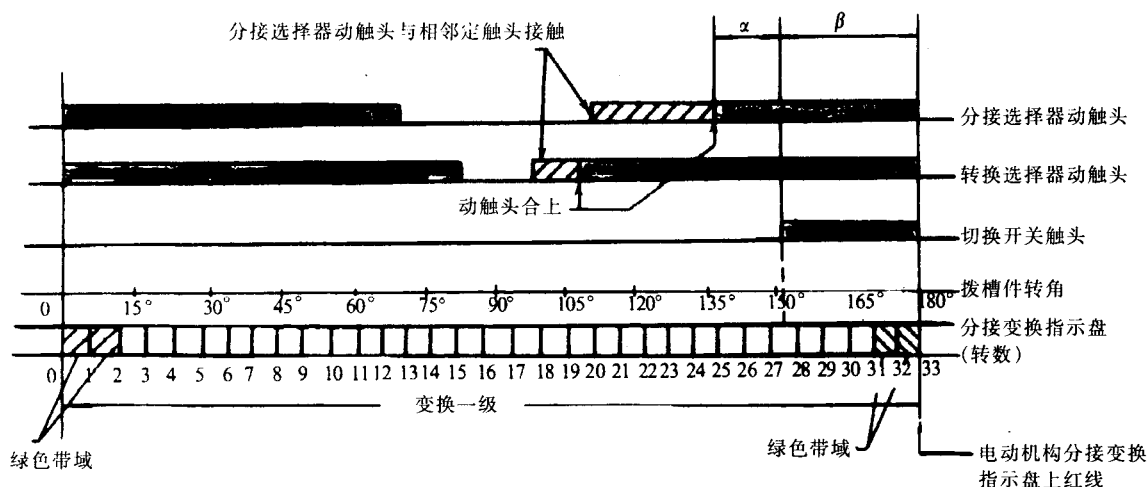


图 25-27 分接开关动作顺序的程序图

α —分接选择器触头与切换开关触头之间动作间隔 β —切换开关触头动作后剩余间隔

但是,对于动触头合上相邻定触头及其切换开关的变换操作仍需听响声来记录。

触头动作顺序通常采用程序表来表示。当测量分接开关转矩与动作顺序结合时,即可采用程序图来表示。

6 机械运转试验

机械运转试验是分接开关出厂试验的重要项目之一。它可以验证分接开关制造上是否存在影响运行的缺陷。因此,机械运转试验是检查部件加工和装配质量的重要手段。机械运转试验按下述步骤进行。

6.1 分接选择器和切换开关按整定工作位置总装

对于组合式分接开关,分接选择器和切换开关必须按照整定工作位置表中的规定进行总装。

总装后,再次核对各触头位置是否符合整定工作位置表上的规定位置。

有载分接开关整定工作位置图是分接开关一张极其重要的指导性图。它不仅示意了各分接开关的接线端子的实际布置和相应的调压电路,而且还反映出分接开关变换操作中各触头的动作顺序。更重要的是指出了特定分接开关的整定工作位置,即分接开关各触头所处的工作位置。这个整定工作位置对于分接开关总装、调试具有重要的指导作用。分接开关在其整定工作位置下总装、联结和调试后,方能保证其工作可靠性。一旦联结错位,就会造成分接开关意外的损坏,从而丧失工作可靠性。由此可知,整定工作位置图是十分重要的。

不同规格的分接开关,都有不同的整定工作位置图。下面分别以线性调和正反调的调压电路为例来确定整定工作位置。

6.1.1 线性调压电路的整定工作位置

线性调压电路的整定工作位置实质上就是分接选择器的固有分接位置数的中间位置。它的典

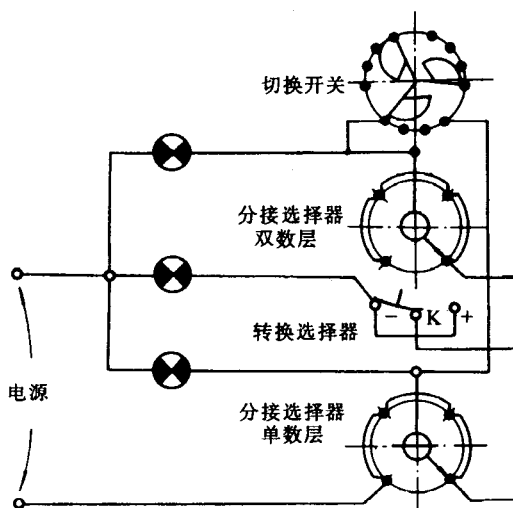


图 25-28 分接开关触头动作顺序测量线路

型例子见图25-29。

从图25-29中可以知道,调压级数等于分接头最大工作位置数。它的整定工作位置数是在“5”分接位置上。

假定线性调的调压电路有 n 级调压,其整定工作位置 m 则为 $(n+1)/2$,并且整定位置应在 $n \rightarrow 1$ 变换方向的第 m 位置上。

6.1.2 正反调压电路的整定工作位置

对于正反调的调压电路,整定工作位置就是分接选择器的工作位置数的中间位置。假定为 n 级调压,其中间位置数为 m ,则整定工作位置数 K 为 $(n+m)/2$ 。例如,10191W调压电路中, n 为19级, m 为1, K 必然是10;而10193W调压电路中, $n=17$ 、 $m=3$,则 $K=10$ 。由此可知,10191W和10193W调压电路,其整定工作位置数都是“10”。它们的典型调压电路及其整定工作位置图分别如图25-30和图25-31所示。

从上述整定工作位置图可知,各调压电路位置变化有下述的规律:

- (1)分接开关在任何位置反向操作时,不需要进行分接选择,只需切换开关进行切换就可以了。
- (2)分接开关如 $2 \rightarrow 3$,是单数分接选择器 $1 \rightarrow 3$;分接开关如 $3 \rightarrow 4$,是双数分接选择器 $2 \rightarrow 4$ 。这就是说,双数选择器接通电路,下一个动作一定是单数选择器预选;单数选择器接通电路,下一个动作一定是双数选择器预选;而且两者的动作都符合级进原则。
- (3)线性调的调压电路中,其整定工作位置为调压级数 n 的中间位置,即 $m=(n+1)/2$ 。
- (4)正反调和粗细调(一个粗调级)的调压电路中,其整定工作位置是分接选择器工作位置数的中间位置,它取决于调压级数 n 和中间位置数 m ,即 $K=(n+m)/2$ 。
- (5)整定工作位置在 $n \rightarrow 1$ 变换方向上进行确定,即极性选择器处在“ $K,-$ ”接通位置,粗调选择器处在“ $0,-$ ”位置接通。

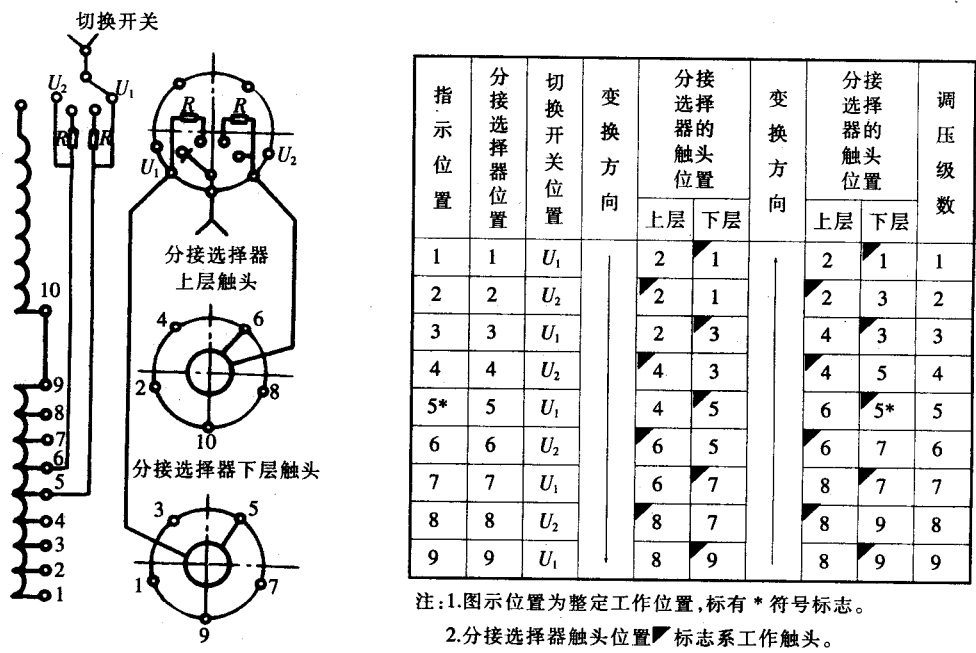
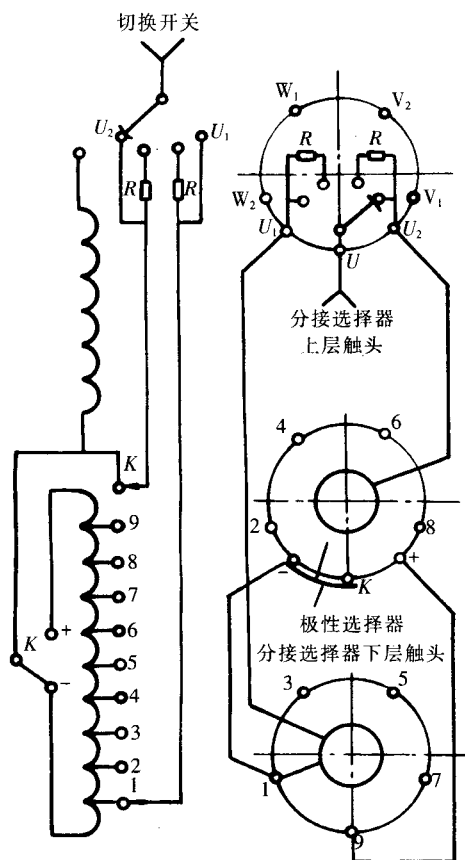


图25-29 线性调10090调压电路的整定工作位置图



指示位置	分接选择器位置	切换开关位置	变换方向	分接选择的触头位置		变换方向	分接选择的触头位置		调压级数
				上层	下层		上层	下层	
1	1	U_1	K_+	2	1		2	1	1
2	2	U_2		2	1		2	3	2
3	3	U_1		2	3		4	3	3
4	4	U_2		4	3		4	5	4
5	5	U_1		4	5		6	5	5
6	6	U_2		6	5		6	7	6
7	7	U_1		6	7		8	7	7
8	8	U_2		8	7		8	9	8
9	9	U_1		8	9		K	9	9
10	K	U_2		K	9		K*	1	10
11	1	U_1	K_-	K	1		2	1	11
12	2	U_2		2	1		2	3	12
13	3	U_1		2	3		4	3	13
14	4	U_2		4	3		4	5	14
15	5	U_1		4	5		6	5	15
16	6	U_2		6	5		6	7	16
17	7	U_1		6	7		8	7	17
18	8	U_2		8	7		8	9	18
19	9	U_1		8	9		8	9	19

注:1.图示位置为整定工作位置,标有*符号标志。

2.分接选择器触头位置■标志系工作触头。

图25-30 10191W(±9级)正反调压电路及整定工作位置图

(6) 极性选择器或粗调选择器必定在通过其整定工作位置时动作,即 $1 \rightarrow n$ 操作时,随触头从 $(n-1)/2 \rightarrow (n+3)/2$ 一起动作; $n \rightarrow 1$ 操作时,随触头从 $(n+3)/2 \rightarrow (n-1)/2$ 一起动作。此时,极性选择器或粗调选择器位置指示数:

$1 \rightarrow n$ 操作时 $(n+1)/2 \rightarrow (n+3)/2$; $n \rightarrow 1$ 操作时, $(n+1)/2 \rightarrow (n-1)/2$

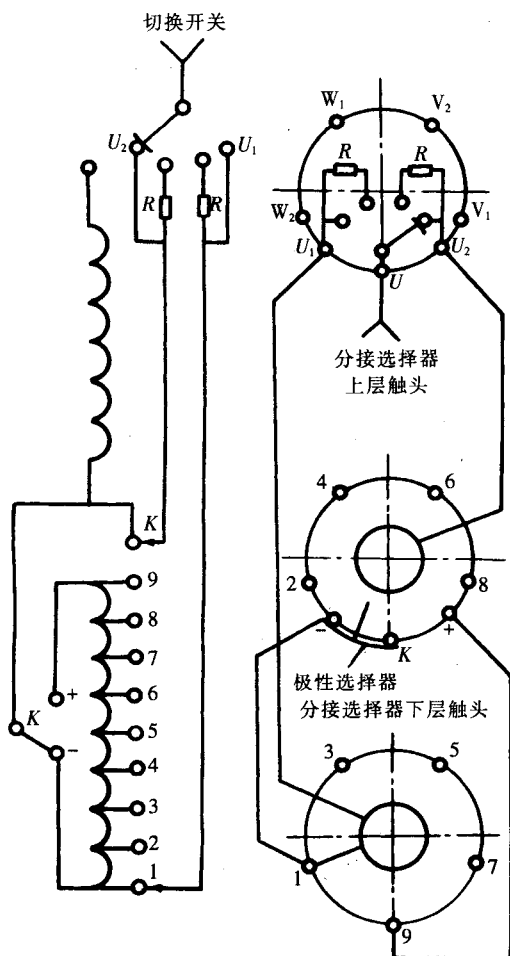
6.2 分接开关与电动机构的联结和调整

(1) 分接开关与电动机构按相同整定工作位置进行联结。一旦联结错位,则会造成当分接开关到达终端位置而电动机构却继续朝前运转,由于分接开关机械限位作用将造成机械运转部件的损坏。

(2) 校验正反两个转动方向旋转差数的平衡。分接开关与电动机构联结时;必须调整切换开关动作切换瞬时(或选择开关动作切换瞬时)到电动机构动作完了之间的时间间隔,对于两个旋转方向应是相同的。

用手柄向 $1 \rightarrow n$ 方向摇动,待切换开关或选择开关动作时(听到切换响声),继续转动手柄直到电动机构分接变换指示轮上绿色带域内的红色中心标志出现在观察窗中央时停止摇动,记下旋转圈数 m 圈。

反方向 $n \rightarrow 1$ 摇动手柄回到原来整定位置,同样按上述方法记下旋转圈数 K 圈。若旋转圈数 $m=K$



指示位置	分接选择器位置	切换开关位置	变换方向	分接选择的触头位置		变换方向	分接选择的触头位置		调压级数
				上层	下层		上层	下层	
1	1	U_1	K_+	2	1		2	1	1
2	2	U_2		2	1		2	3	2
3	3	U_1		2	3		4	3	3
4	4	U_2		4	3		4	5	4
5	5	U_1		4	5		6	5	5
6	6	U_2		6	5		6	7	6
7	7	U_1		6	7		8	7	7
8	8	U_2		8	7		8	9	8
9	9	U_1		8	9		K	9	9
10	K	U_2	K_-	K	9		K*	1	
11	1	U_1		K	1		2	1	10
12	2	U_2		2	1		2	3	
13	3	U_1		2	3		4	3	11
14	4	U_2		4	3		4	5	12
15	5	U_1		4	5		6	5	13
16	6	U_2		6	5		6	7	14
17	7	U_1		6	7		8	7	15
18	8	U_2		8	7		8	9	16
19	9	U_1		8	9		8	9	17

注:1.图示位置为整定工作位置,标有*符号标志。

2.分接选择器触头位置▣标志系工作触头。

图25-31 10193W(±8级)正反调压电路及整定工作位置图

时,说明联结无误,无需调整。若旋转圈数 $m \neq K$ 时,对于DCJ10电动机构, $|m-K|>1$ 时,对于DCJ30电动机构 $|m-K|>6.5$ 时,需要旋转圈数的差数平衡。松开电动机构垂直传动轴,然后用手柄向多圈数方向摇动 $1/2|m-K|$ 圈,然后再把电动机构与垂直传动轴联结起来。

按上述的步骤,再次检查电动机构与分接开关的旋转差数,直到校验出 $|m-K|$ 的差数在允许规定要求内为止。举例说明:

ZY1A-Ⅲ500/110D-10191W分接开关与DCJ10电动机构的联结校验见图25-32所示。

自整定工作位置10位置摇至11位置, $m=5$ 圈

自11位置摇回整定位置10位置, $K=$

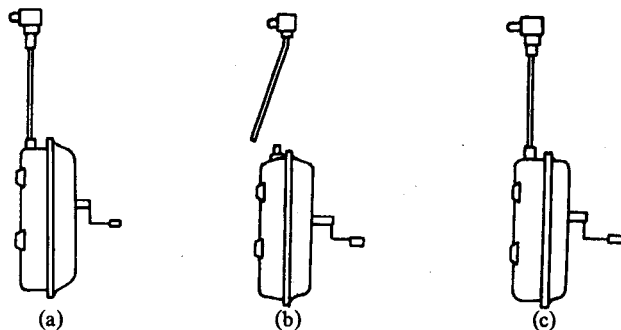


图25-32 分接开关与电动机旋转差数的平衡校验

(a)联结后记录 m 和 K 圈数 (b)松开垂直传动轴与电动机联结,向多圈数方向转 $|m-K|/2$ 转 (c)重新联结校验

3圈

手柄旋转圈数的差数 $m-K=2$ 圈 >1 圈

调整圈数: $(m-K)/2=2\times 1/2$ 圈 $=1$ 圈

松开垂直传动轴与电动机构的联结见图25-32(b),按上述调整圈数将手柄向10→11位置方向转动一圈,然后再把垂直传动轴与电动机构联结起来。检查两个转动方向的旋转差数是否平衡。

6.3 分接开关的机械运转试验

为便于批量生产,试验可在一个专门制作的调试架上进行,试验时应充入变压器油。

(1)分接开关电动操作前,手动操作检查分接开关与电动机构联结的正确性及两终端机械限位工作可靠性。

(2)在确信联结无误后,电动操作2 000次分接变换,并检查两终端位置的电气限位装置的工作可靠性。

(3)检查分接开关位置指示、电动机构位置指示和遥远位置指示三者的同步情况。

(4)电动机构在电源电压为额定电压85%和110%情况下,各操作一个循环应能可靠地工作,必要时应记录电动机工作电流。

6.4 分接开关解体检查

分接开关经2 000次机械运转试验无故障后,进行解体检查。着重检查运动零部件的磨损是否正常,零部件有无运动卡滞碰伤痕迹和损坏。在未发现异常情况后,分接开关重新组装。

6.5 重新组装分接开关继续进行10个循环机械运转试验

在分接开关重新进行10个循环运转试验中,还要结合触头动作顺序的测量及其电动机构功能试验。

总之,在机械运转的2 000次试验中,若未发现任何故障,开关解体检查又未发现零部件卡擦、损坏和过度磨损,重新组装后10个循环操作无误,即认为机械运转试验合格。

7 油室的密封试验

油室的密封试验按其试验方法分为油压试漏法和气压试漏法两种,按其试验性质分为例行试验和型式试验两大类。现分别介绍各自的情况。

7.1 油室密封试验方法

7.1.1 油压试漏法

油压试漏法又称为静压试漏法,即油室充满变压器油后施加压力,保持一定时间进行检漏。采用这种试漏方法惟一的缺点是介质环境温度变化对油压产生影响,无法保持油压恒定。为此,大多采用油柱静压试漏法,如图25-33中所示。油柱静压试漏法是在油室充满变压器油后,加上7.5m油柱(相当于60kPa)压力进行检漏。这个试漏法的优点在于维持油室一个恒定静压力,消除介质环境温度变化对油压的影响,但试漏时间较长,通常规定为24h。有的试漏方法规定,为了缩短试漏时间,用增大试漏压力来弥补。

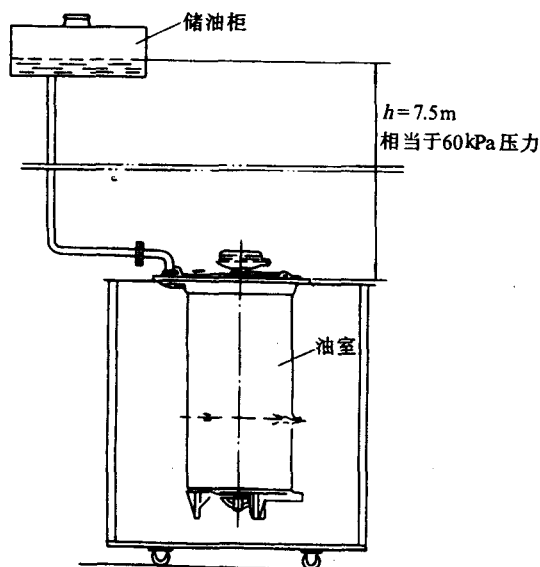


图25-33 带变压器油的压力试漏布置
(油柱法 $h=7.5\text{m}$)

7.1.2 氟里昂气体试漏法

由于油压试漏法对油室渗漏检修带来不便。为此,目前有的制造厂家采用气压试漏法。它借助气体特性,检漏更加灵敏,一般只需维持压力20min后,就可以开始检漏,整个检漏过程只有一个小时左右。在这么短时间内,可以忽略气体温差变化对压力的影响。气压试漏法见图25-34。

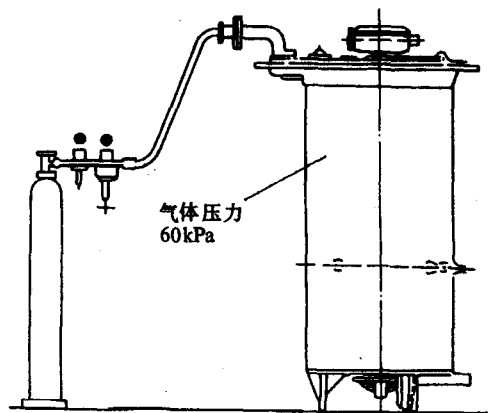


图25-34 气压试漏法

早期气压试漏法采用氟里昂气体,先充入55kPa压缩空气后,再充入氟里昂气体至60kPa。检漏用卤素检漏仪,在油室所有密封部位上检测。当密封部位上发生泄漏时,检漏仪会自动发出报警信号。由于油室不注油,泄漏处的检修较为方便。近期,氟里昂气体检漏法逐渐被氮气试漏法所替代。

7.2 油室密封的例行试验

每台油室装配后均需进行密封的例行试验。采用气体压力试验时,试验压力为60kPa,维持压力时间为20min。然后在油室所有密封部位上用检漏仪检测。若采用油柱法试漏时,采用室温的变压器油,油柱高度约7.5m,恒压保持24h,检查油室所有密封部位有无渗漏油。油室密封例行试验在于考核油室的装配质量及零部件加工的质量。

油室密封的例行试验也可以采用室温的油介质,压力 $2 \times 10^5 \text{Pa}$,恒压保持10min,然后检查密封部位有无渗漏,如无励磁分接开关就采用此类方法试漏。

7.3 油室密封的型式试验

7.3.1 油室密封的功能试验

油室密封的功能试验系为重复进行油室密封的例行试验。若采用油压试漏法时,油温应为 $75 \pm 5^\circ\text{C}$ 。

7.3.2 干燥处理后的油室密封试验

将型式试验的油室分为两组。一组进行真空干燥处理;另一组进行气相干燥。两种不同干燥处理的油室分别进行密封试验,目的在于考核密封胶料的热稳定性。

7.3.2.1 真空干燥处理(油室不带油条件下)

- (1)预加热:将油室放入约为 60°C 的烘房内,温度上升率为 $10^\circ\text{C}/\text{h}$ 。最高温度为 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 。
- (2)第一阶段加热:在循环空气中加热20h。
- (3)第二阶段加热:真空干燥持续160h以上,最高温度为 110°C ,残余压力 $\leq 133.3 \text{Pa}$ 。

7.3.2.2 气相干燥处理(油室打开底部泄漏螺钉条件下)

- (1)加热到 125°C 左右,温度上升率约 $30^\circ\text{C}/\text{h}$,压力增加 $(1 \sim 100) \times 133.3 \text{Pa}$ 。
- (2)压力降低约3h。
- (3)真空度 $\leq 133.3 \text{Pa}$,最高温度 125°C ,持续时间约100h。

重复地进行油室密封的功能试验。若采用油压试漏法时,油温应为 $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 。

7.3.3 型式试验结束后的密封试验

分接开关全部型式试验后,重复进行油室密封功能试验。目的在于考核动态密封胶件在几十万次机械磨损试验后的密封功能。上述三个项目的密封试验合格后,则可以认为型式试验通过了。

8 绝缘强度试验

分接开关的绝缘强度以工频和冲击电压的耐压试验来验证。对于110kV电压等级及其以上的分接开关,还需进行局部放电测量。对330kV及以上开关,还需进行操作冲击电压试验。分接开关施加试验电压的部位见图25-35所示。

(1)对地:带电体部位对地(见图25-35中A)

(2)相间:组合式分接开关

切换开关相间(见图25-35中B)

分接选择器相间(见图25-35中D)

转换选择器相间(见图25-35中F)

复合式有载分接开关

选择开关相间

转换选择器相间

无励磁分接开关开关本体相间

(3)分接选择器(或选择开关)和转换选择器(如果有的话)的同相最大分接与最小分接间:

分接选择器同相首末分接间(见图25-35中H)或无励磁分接开关首末分接间

转换选择器同相的相邻触头间(见图25-35中G)

(4)分接选择器或选择开关的同相任意相邻触头间与分接开关触头布置有关的任何其他触头间:

无励磁分接开关同相的相邻触头间

分接选择器同相的相邻触头间(见图25-35中E)

(5)切换开关在最终打开触头间:

切换开关级间(见图25-35中C)

上述绝缘强度的试验电压值规定在相应的技术文件中。对于绝缘强度试验,分接开关应按使用情况进行组装、布置和干燥处理,但不必包括引线。只要能表明在同样绝缘条件下施加试验电压,则试验可在单独的组成部分上进行。

对于上述试验,每相带电部分应短接起来,并在合适的情况下,把它们或接电源或者接地。对于油浸式分接开关要在变压器油中进行绝缘试验,油的绝缘强度应大于40kV以上。

8.1 工频耐压试验(例行试验或型式试验)

用单相交流电压,按GB311.3《高电压试验技术》第3章中的有关规定,在要求的耐受电压值下进行试验,每次试验的持续时间为1min。对于油浸式分接开关,例行试验允许在室温的变压器油中进行。型式试验时,油温应不低于65℃。

8.2 雷电冲击电压试验(型式试验)

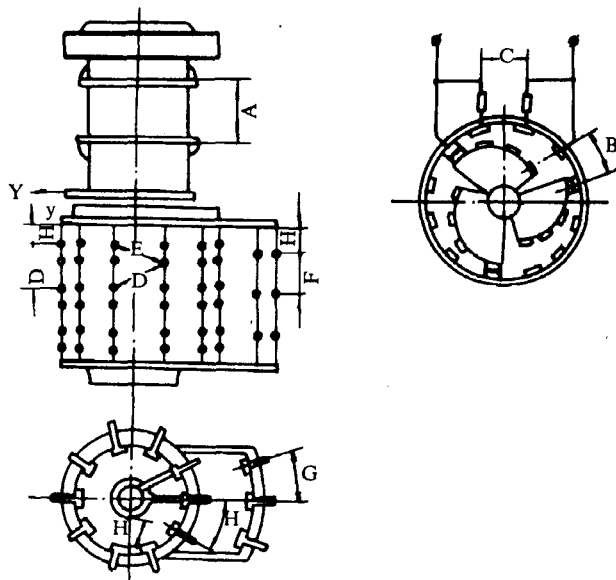


图25-35 分接开关绝缘强度试验部位

A—带电体对地 B—切换开关相间 C—切换开关级间
D—分接选择器相间 E—分接选择器相邻触头间(同相)
F—转换选择器相间 G—转换选择器同相相邻触头间
H—分接选择器最大与最小分接间(同相)

雷电冲击电压试验的全波(1.2/50 μ s)和截波(2 μ s~6 μ s)的标准波,应按GB311.3《高电压试验技术》第4章中的有关规定,但截波的波形电压过零系数应小于0.25。每个试验应按规定的耐压电压值,在正极性电压和负极性电压下各试三次。

8.3 操作冲击电压试验(型式试验)

对于在330kV及以上变压器的任何线端的分接开关,在带电部分和接地部分之间进行本试验。冲击波形和试验顺序应符合GB1094.3—2003标准第15条规定,冲击电压值应从GB10230标准或产品技术条件中选取。

8.4 局部放电测量

对于安装在 $U_m=252$ kV及以上的自耦变压器上,最高工作电压 U_m 为126kV及以上电压下工作的第Ⅱ类分接开关(包括110kV末端),在它的带电部分与接地部分之间应进行局部放电测量,其目的在于检验分接开关对地绝缘所存在局部缺陷能否满足在高电压下长期运行的需要。

局部放电的检测回路采用对防止电源和试品高压侧的噪声比较有效的电桥平衡器电路,如图25-36所示。

在图25-36中, u 为工频(AC、50Hz)电源电压; Z 为低通滤波器,其值较 Z_m 大,使得在局部放电发生时, C_k 与 C_x 之间能较快地转换电荷,但电源在重新充电过程时,则较为缓慢; C_x 为试品电容; C_k 为耦合电容,其值一般不小于 C_x ; Z_m 、 Z'_m 为测量阻抗,其值足够大,其数量级为若干千欧,这样才能保证有足够大的输出电压; C_m 、 C'_m 为电桥两臂的电容,其电容量大将使输出脉冲峰值降低,为使电桥平衡,则 $C_x/C_k=C_m/C'_m=R_m/R'_m$;A为放大器,为获得最佳信噪比,放大器的时间常数应与测量回路的时间常数相等,即放大器应有一定的频带宽度;M为测量仪器,为便于观察放电量和放电次数,判断区分脉冲是否由电源干扰或高压线电晕产生,采用示波器作为测量装置较好。

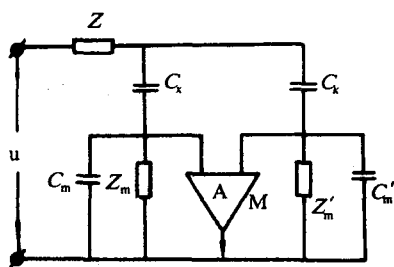


图25-36 局部放电测量试验电路

为确保试验的准确性,试验电路中所有元件和接线不应有影响测量精度的放电现象的发生。必要时,还需对部分电路采取适当有效的屏蔽措施,以防止外来的干扰。注意,此时试品应与地绝缘。

施加试验电压的时间顺序如图25-37所示。试验时,在不大于 $\frac{1}{3}U_2$ 的电压

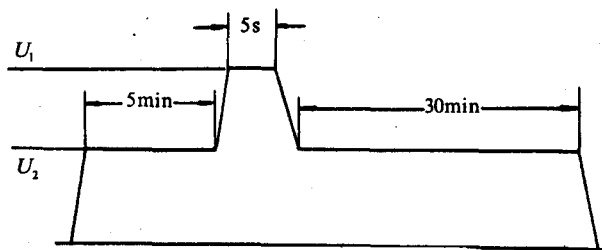


图25-37 局部放电测量对施加试验电压的时间顺序

下接通电源并增加至 U_2 ,持续5min,再增加至 U_1 ,保持5s。然后,立即将 U_1 降低到 U_2 ,保持30min。当电压再降低到 $\frac{1}{3}U_2$ 以下时,方可切断电源。试验持续时间与试验频率无关。

在施加试验电压全过程中,应监测局部放电量“视在电荷” q 不得高于规定值。

U_1 为预加电压,其值为 $\sqrt{3}U_m/\sqrt{3}=U_m$;

U_2 为测量电压,其值为 $1.5U_m/\sqrt{3}$ 时, q 值不大于50pC。

局部放电的观察与评定如下(详细资料见GB1094.3的附录A):

在施加试验电压的前后应记录背景噪声水平;

背景噪声水平应低于视在电荷量 q 的规定值的一半;

在电压升到 U_2 水平和从 U_2 再下降时,要记录放电的起始电压和熄灭电压。

在电压 U_2 的第一阶段应取一个读数并记录下来。在短时施加电压 U_1 时,局部放电量的值必须记录,但不作判断之用。在电压 U_2 的第二阶段的全过程中,局部放电的水平应连续观察并每隔一定的间隔记下或录下其读数。

在上述观察过程中,如果试验电压不产生突然下降,并在施加 U_2 电压的30min的最后29min内,视在电荷的连续水平一直低于规定的限值,并且没有明显而稳定地升高的趋势,则认为试验合格。

如果出现视在电荷的读数超过规定限值,经过一段时间后回到这个水平以下的情况,则试验可连续下去而无需中断,直到在30min的时间内取得可以接受的读数为止。偶然性较高脉冲可忽略不计。

总之,在分接开关绝缘试验中,除了工频电压试验是例行试验项目外,其他的雷电冲击电压试验、操作冲击电压试验和局部放电量测量均是型式试验的项目。

9 电动机构试验

电动机构试验是与它的技术要求相对应的。电动机构试验项目见表25-12所示。

表25-12 电动机构试验项目及程序

序	试验项目	试验种类	备 注
1	外观检查	例行检查	
2	逐级操作可靠性检查	例行检查	
3	安全保护可靠性检查	例行检查	
4	位置指示可靠性检查	例行检查	
5	转动力矩测量	例行检查	
6	机械运转试验	例行检查	包括操作电源变化试验
7	电气绝缘回路试验	例行检查	
8	机械寿命试验	型式试验	与分接开关一起进行
9	防止超越试验	型式试验	
10	电动机机构箱保护等级试验	型式试验	
11	操作噪声试验	型式试验	

下面着重介绍试验项目、内容及试验方法。

9.1 外观检查

电动机构外观检查除了与分接开关外观检查要求相同外,还需对电气设备的型号、规格、技术数据进行检查,判定是否符合技术要求;检查电气接线的正确性和接线排列布置是否整齐美观等。

9.2 逐级操作可靠性检查

逐级操作可靠性检查包括下述内容:

逐级操作抗干扰试验;

方向记忆凸轮行程开关动作顺序检查;

电气设备动作顺序正确性检查(交流接触器、中间继电器);

电动机刹车可靠性检查。

上述的试验和检查均需达到技术要求,否则逐级控制可靠性就无法得到保证。

9.3 安全保护可靠性检查

安全保护可靠性检查,包括下述内容:

极限位置操作功能检查,着重检查电气极限保护(主回路和控制回路)和机械极限保护的顺序和作用功能;

手动操作安全保护功能检查;

旋转方向保护(相序保护)检查;

控制电压临时失压后自动再启动的功能检查;

紧急断开电源功能检查;

固定加热装置和低温加热保护装置功能检查。

上述的功能检查均需达到例行试验的要求。

9.4 位置指示可靠性检查

位置指示可靠性检查包括下述内容:

电动操作方向指示检查;

手动操作方向指示检查;

操作计数功能检查;

就地位置指示(包括机械位置指示轮,分接变换指示轮)的功能检查;

遥远位置指示功能检查。

值得指出的是就地位置指示和遥远位置指示一致性检查具有重要的意义。

9.5 转动力矩的测量

转动力矩测量包括下述内容:

手柄操作转动力矩测量;

输出轴转动力矩测量。

必要时,允许测量电动机工作电流变化范围。

9.6 机械运转试验

机械运转试验可以单独进行,也可以与分接开关联结后一起进行,并同时进行操作电源变化的试验,即在85%和110%的额定电压下各操作一个循环。

9.7 电气回路绝缘试验

电动机机构的电气回路除电动机、低压6V线路、电源自动开关的辅助接点外,均进行2kV、1min工频电压试验,试验施加于:

(1)导电回路对地之间。

(2)不同电路各部位之间。

(3)同一电路元件的分离触头之间。

在保证电气设备的质量条件下,可以不进行款(2)和款(3)的试验。必要时,可测量电气回路的绝缘电阻。

9.8 机械寿命试验

电动机机构应在其输出轴与它所应该带动的最大分接开关联结,进行跨越全分接范围的50万次变换操作试验。

在进行本试验时,各有1万次操作试验应分别在85%和110%的额定电压及90%到105%额定频率的范围内完成。还有100次操作试验应在-25℃的温度下完成。在试验时,包括项9中的2、3、4、5、6的所有装置,其功能的正确性应予验证。试验期间,机械零件不应出现故障或过分磨损。

9.9 超越试验

在电气极限位置保护开关短接情况(人为故障)下,进行10次电动超越试验,其机械限位装置应可靠的动作,起着防止超越极限位置的保护。对于采用机械终端止动装置的电动机构不应出现机械的损坏,且电动机构短路保护应起可靠的作用。

9.10 电动机构箱的保护等级试验

电动机构应按GB4942.2《低压电器外壳防护等级》标准的规定进行淋雨和防尘试验。

9.11 操作噪声测试

在电动机构箱体关闭下进行电动操作,距箱体1m远处测得噪声值应低于70dB。

10 机械寿命试验

机械寿命试验的目的是考核分接开关的机械结构能否达到规定要求的机械操作次数。一般情况下,试验应相当于正常使用情况下的空载操作。

分接开关的安装、干燥处理、充油或浸在充油试验油箱中和操作等方面均像正常使用情况一样。

无励磁分接开关应能承受10 000次机械寿命试验。试验时,正反转动各5 000次。试验允许在变压器油中进行,也允许在空气中进行。在空气中进行试验时,所有转动部件应涂有足够的变压器油润滑。对于电动无励磁分接开关,应按有载分接开关机械寿命的条件考核。但试验次数仅是10万次分接变换操作。有载分接开关机械寿命试验应在被试分接开关的整个分接范围上进行50万次分接变换操作。在转换选择器上至少应进行5万次分接变换操作。为了达到对转换选择器操作次数的要求,允许一部分试验在以转换选择器操作位置为中心的小范围内进行。

对于环境是空气的分接开关,本试验可在室温下进行。对于环境是油的分接开关,试验的一半应在不低于75℃的温度下进行;另一半在较低的温度下进行。例如,加热和冷却过程中,每日温度循环变化是允许的。

试验过程中除已明确的易损件之外,其他零部件不允许更换,但可以按规定进行正常的维修。在每次维修时应对分接开关的功能和运动部件的磨损进行检查。

无论是以空气或油介质的分接开关,其切换开关或选择开关应在-25℃时进行100次操作,每个操作用示波器记录。这些示波图与前段中所得到的那些示波图进行比较,应表明分接开关适宜低温使用。

在机械寿命试验过程中,应进行下述项目检查和测量:

(1)检查分接开关的动作顺序:在试验开始、每5万次操作之后和试验结束时,应摄取切换开关和分接选择器或选择开关以及装上了转换选择器的无载示波图10张。将这些示波图进行比较,应无明显的差别并符合要求。

(2)检查分接开关(包括电动机构)各部位磨损程度和机械零件有无故障,并逐件记录或拍照,从而判定应无故障和过度磨损。

(3)测量分接开关转动力矩应无明显变化。必要时测量电动机工作电流和波形,比较应无显著差别。

(4)测量分接开关触头参数及接触电阻无明显变化,触头参数仍符合技术文件规定的要求。

(5)检查紧固件应无松退。

(6)试验结束后检查油室的密封性能应保持良好的状况。

总之,试验后的分接开关达到上述要求,即可认为试验合格。

11 低温操作试验

对于油浸式分接开关,变压器油则为运动润滑剂。因而,它的运动状况与变压器油的黏度有关。变压器油的黏度是评价其流动性的一个指标。黏度的大小实质就是分子间摩擦产生阻力的大小。黏度高,运动阻力就大。因此要求变压器油的黏度小、流动性好。黏度的大小还与温度有关,油温越低,黏度越大。而且变压器油中或多或少都含有石蜡成分。油的黏温性又取决于它所含石蜡量的多少。在低温下,石蜡就会从变压器油中析出,开始时使油混浊逐步失去流动性,最后使油全部凝固。因此,研究分接开关低温下操作功能,尤其对我国地处东北、西北寒冷地区运行的分接开关具有现实意义。

低温操作试验是型式试验的一个组成部分,也往往列为特殊试验项目。在机械寿命试验中,明确规定需进行 -25°C 下100次操作试验,但是为了保证低温操作可靠性,开展更低温度下操作试验研究也具有现实意义。

11.1 在 -25°C 下100次操作试验

低温操作试验是将注入有变压器油(一般牌号为25号)的切换开关或选择开关放到低温室中进行试验。切换开关或选择开关是用电动机构进行逐级操作,油的温度在切换开关或选择开关的4个不同位置上进行测量。图25-38中示出这些测量点。在进行操作功能试验时,用示波器记录以下数据:

切换开关或选择开关触头变换程序;
快速机构的释放时间和程序。

根据所记录的数据可以正确地评估其低温操作功能。试验程序按其下述的三种不同温度下进行,所有操作都用示波记录。

(1)环境温度:(开始试验)进行10次变换操作。

(2)在 -25°C 下:进行100次操作,第11次至90次操作之间采用慢速供纸拍取示波图。

(3)环境温度:油温回升后进行10次操作。

在低温功能试验中,电动机构中的电动机电流采用示波记录。温度的变化过程是用多通道记录仪来记录。电动机构采用遥控启动。随着低温室温度变化,分别测量电动机构箱内温度分布情况,并进行电动机构功能试验。

分接开关在低温操作下允许其切换时间有所延长,但试验结果应表明,在规定的低温下,分接开关能可靠地完成分接变换操作,试验为合格。

表25-13表示ZY1A(M)切换开关低温功能试验下测试数据。表25-14表示DCJ10电动机构低温功能试验下测试数据。图25-39所示为ZY1A(M)切换开关低温功能试验的示波图。从上述数据中证实,在 -25°C 低温下操作功能正确无误。

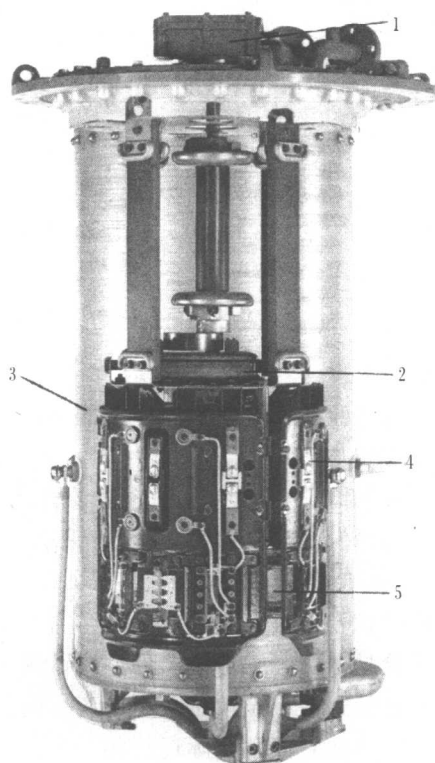


图25-38 在 -25°C 下功能试验测量点

1—低温室的环境温度 2—分接开关头部
3—快速机构 4—触头系统 5—过渡电阻器

表25-13 ZY1A(M)切换开关低温试验测试数据

室温	分接开关头部	快速机构	触头系统	过渡电阻	切换时间/ms	切换方向
+21	+21	+21	+21	+21	46-48 47-48	A-B B-A
-25	-24.9	-25.2	-25.3	-25.3	62-66 62-68	A-B B-A
控制示波图没有评价						
-25	-25	-25.1	-25	-25.1	62-64 63-65	A-B B-A
+18.5	+18.5	+18.5	+18.5	+18.5	46-48 48	A-B B-A

表25-14 DCJ10电动机机构低温功能试验测试数据

室温	位置指示器	级进开关	齿轮盒	电气控制系统	电阻加热器
+20.6	+21.7	+23.9	+25.1	+20.9	+23.7
-26.0	-6.8	-3.0	+0.6	-14.1	-4.6
-26.2	-8.3	-4.7	-2.3	-14.7	-5.6
-26.5	-8.0	-4.6	-2.4	-14.7	-5.3
-24.6	-7.7	-4.6	-2.7	-14.4	-5.6

11.2 在-40℃低温下功能试验

低温功能试验是将注入40号变压器油的切换开关和分接选择器放到低温室进行试验。所有试验的技术要求均与-25℃低温试验相同。

从图25-40和图25-41中可以清楚看出,切换开关的切换时间和转换选择器转矩在低温环境下明显增加。为确保低温操作可靠性,可采用凝固点低的变压器油(40号变压器油),给切换开关加热(或选择开关加热)以及在油温低于-25℃以下时停止动作的措施。

12 切换试验

切换试验是分接开关最主要的型式试验项目。它包括工作负载切换试验和开断容量试验两项。试验应模拟分接开关在设计定额下所产生的最严重的条件。

切换试验是在验证和实际运行相一致条件下,即施加通过电流和相关级电压时,各电器部件长期连续地进行正常分接切换的能力、电弧触头电磨损量是否满足规定切换次数,以及切换开关或选择开关油室内油的污损程度等,从而获得分接开关实际运行中维护数据。由于这项试验要花费大量时间和财力,因而,只能选择对分接开关最具有代表性的额定值下进行。

切换试验可以用切换开关或选择开关独立进行,但必须证明独立试验不影响触头的操作条件。如果切换开关或选择开关有几个触头组,它们按确定的程序动作,则不允许每个触头组与其他触头组分开来试验。除非能够证明任一组触头的切换操作条件不受其他触头组的切换操作的影响。

对于电阻式分接开关,如果由于分接开关结构上的需要或试验线路的需要,则电阻器可以放在设备的外边,并且还可以比用在产品上电阻器有较大的热容量,另有规定除外。

油浸式分接开关中的油和触头,在每个试验中不应更换。如为三相分接开关,只试验一相的触头。试验线路应使分接开关触头的开断电流、恢复电压以及这些数的乘积,与分接开关在相当的通过电流和相关额定级电压下按相应的切换循环所计算出来数值相比,其变化范围在-5%到+10%以内。

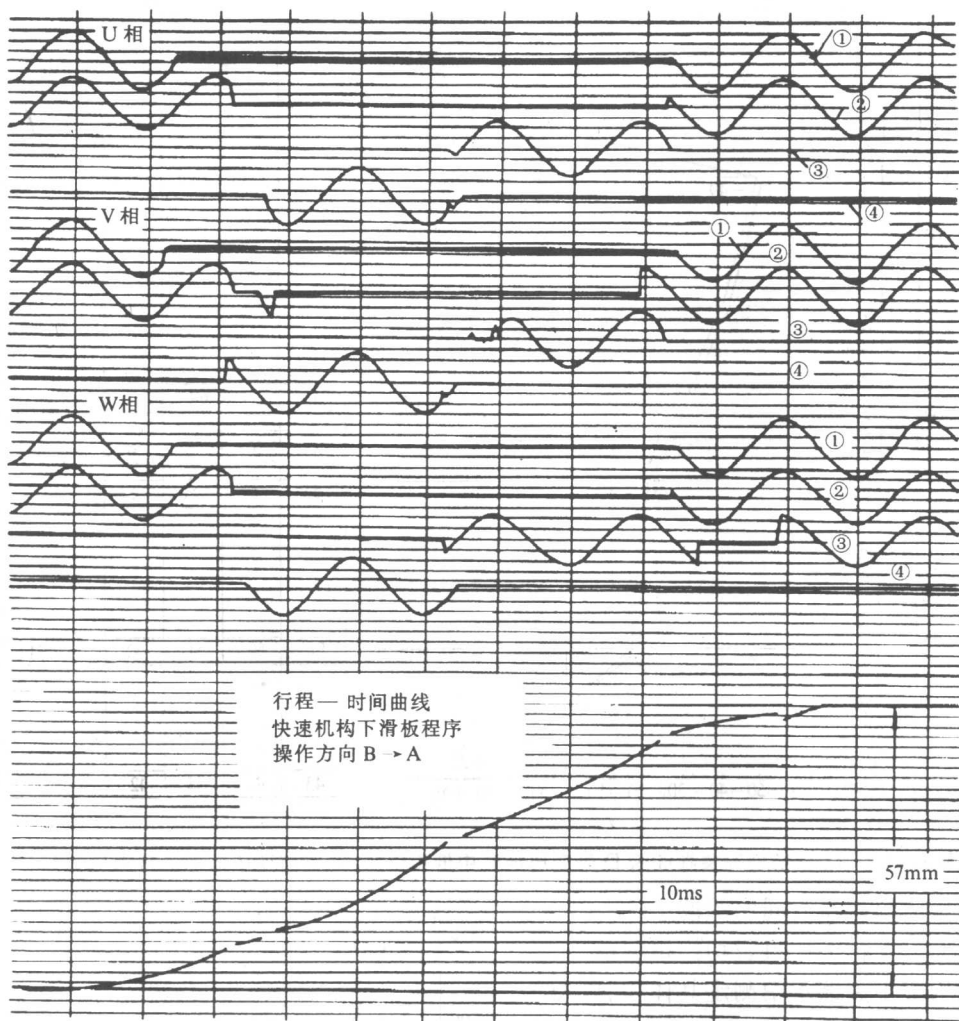


图25-39 ZY1A(M)切换开关低温(-25℃)功能试验的示波图

①主触头切换波形 ②主通断触头变换波形 ③打开侧过渡触头变换波形 ④闭合侧过渡触头变换波形

12.1 工作负载切换试验

分接开关工作负载切换试验有额定级电压下工作负载切换试验和降低级电压下的工作负载切换试验两种方式。两种试验方式中可以任选其中之一进行。

12.1.1 在额定级电压下的工作负载切换试验

切换开关或选择开关触头应在不小于最大额定通过电流和相关级电压下进行相当于5万次的正常工作负载切换试验。选择开关应在不多于8个分接变换位置(不包括尽头位置)上进行试验,以使之近乎于使用状态。如果分接开关的设计带有转换选择器,则这些位置应以转换选择器为中心配置。

在试验进行时,按一定的时间间隔次数拍取示波图,将它们进行比较,不应出现有危及分接开关操作特性的重大变化。在试验开始时,应拍取20张示波图,并在每操作12 500次之后各摄取20张示波图,总计100张。

在工作负载切换试验中,燃弧时间是重要的考核指标。因此,必须拍摄各触头上的通过电流、断

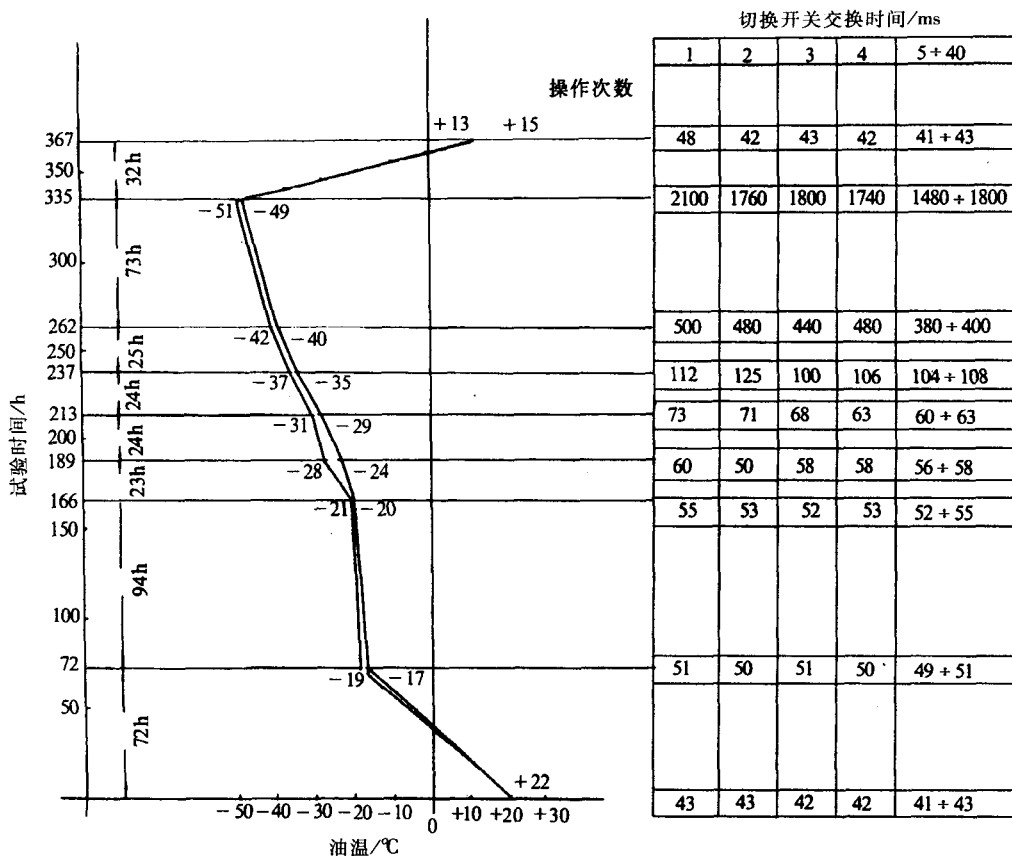


图 25-40 M 型切换开关在壳牌 D 号变压器油中低温试验(试验前变压器油的含水量 $5.2\mu\text{L/L}$)

口恢复电压以及燃弧时间的示波图。为了测定触头烧损量,在工作负载切换试验前后,各个触头均置于蒸馏水中测定其体积,以便确定触头的电气寿命。此外,按一定时间间隔次数进行油样的绝缘强度、含水量、酸值和含碳量的测定。同时,检查切换部分的电弧飞溅范围、绝缘零部件有无损伤等。工作负载切换试验后,进行最终的检查,以确定切换开关或选择开关是否处于良好的状态,能否适宜于使用。

12.1.2 在降低级电压下的工作负载切换试验

可以在降低额定级电压下进行工作负载切换试验,但必须符合下列条件:

(1)应将带新触头的分接开关浸在干净的变压器油中,在最大额定通过电流和相关额定级电压下进行100次的操作,每次操作应做示波记录。

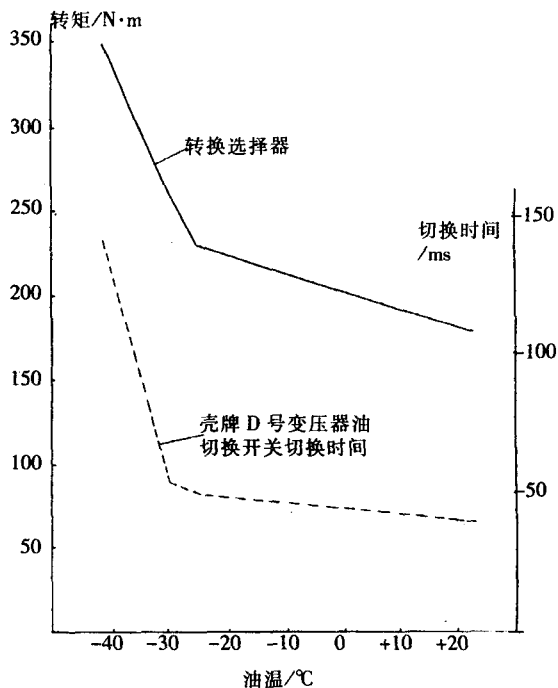


图25-41 M型分接开关切换时间、转矩与温度关系曲线

(2)在项(1)摄取的所有示波图中,如果燃弧时间没有超过 $\frac{1.2}{2f}$ (s)的情况,则按项(4)进行的工作负载切换试验的操作次数应为5万次。

(3)在项(1)摄取的所有示波图中,如果燃弧时间有超过 $\frac{1.2}{2f}$ (s)的情况,则按项(4)进行的工作负载试验的操作次数应予增加,其增加量如下:

$$2S \times 5\,000/100$$

此处,S等于在项(1)的100次操作中,出现超过 $\frac{1.1}{2f}$ (s)的电弧电流的半波周数的总数目。

(4)5万次加上由本款项(3)可能得出的应增操作次数的工作负载切换试验,应不小于最大额定通过电流,在降低了级电压下进行。这个降低了的电压,应使切换的电流不小于在额定级电压下操作所出现的电流,而且不出现截流现象。为了得到所规定的试验条件,过渡阻抗应适当改变。

(5)按本款项(4)试验后,在不更换触头和油的情况下,应在最大额定通过电流和相关额定级电压下进行100次操作,每次都要示波记录。这些示波图与在本款项(1)试验中所取的一系列示波图比较,在分接开关的特性方面应无危及设备操作的变化。

上述规定的试验程序,其目的在于使触头的烧损与在最大额定通过电流和相关额定级电压下进行5万次操作的触头烧损在本质上是相同的。

12.1.3 选择开关的工作负载切换试验

试验可按本款1和2的规定进行。

对于按非对称尖旗循环切换设计的选择开关,由于触头系统结构上的不对称,在与变压器分接绕组连接时必须注意电压的极性,要保证选择开关主通断触头始终处于变压器主绕组的一侧。在这种情况下,过渡触头的切换任务与负载电流的大小和方向无关,而主通断触头的切换任务在一个操作方向上只与负载电流的大小有关,负载电流大时切换任务重。在另一个方向操作时与负载电流的大小相位均有关系,负载电流数值最大且功率因数为零时触头切换任务最重。不过,功率因数为零的情况在实际运行中是极少出现的。大多数变压器也不是经常满载运行。基于上述原因推荐下面两种试验方案:

(1)半数的工作负载切换试验在满载下进行,另一半的试验在空载下进行。这是与实际运行情况最为接近的一种试验方法。

(2)全部试验均在最大额定通过电流且功率因数不大于0.6的负载下进行。这一试验比前一种试验还要严格一些。

上述两种试验方案均在相关额定级电压下进行。为了保证非对称尖旗循环的选择开关试验对电压极性的要求,试验电路中应增加一个倒相电路,以保证每一次切换操作的电压极性均符合要求。

12.2 开断容量试验

开断容量试验是用以验证分接开关的过载切换能力。试验应在两倍最大额定通过电流和相关额定级电压下进行不低于40次操作。

在每次操作摄取的示波图中,燃弧时间应不出现有危及设备操作的现象。如果某台分接开关,有几种额定通过电流和额定级电压的组合,则至少要在最大额定通过电流及其相关的级电压和最大额定级电压及其相关额定通过电流的两种组合下进行开断容量试验。

开断容量试验用的过渡电阻,其热容量和欧姆值应与运行中使用的相同。如不可能的话,在运

行中使用的电阻器应单独试验,但只用两倍最大额定通过电流进行一个变换操作。

12.3 切换试验的评定

12.3.1 燃弧时间

在切换试验中,燃弧时间是重要的考核指标之一。尤其是主通断触头在工作负载切换试验中的燃弧时间不得超过 $\frac{1.2}{2f}$ (s),即使在开断容量试验中,燃弧时间也应不出现危及设备操作的现象。

燃弧时间由拍摄触头上通过电流和断口恢复电压的示波图来测量,如图25-42所示。如若必要时,可以测量电弧功率示波图来判别燃弧时间。

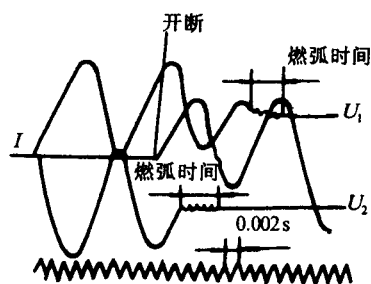


图25-42 切换试验示波图

I —触头切换电流 U_1 、 U_2 —触头断口恢复电压

12.3.2 触头电气寿命

触头电气寿命是分接开关重要技术参数之一。通过切换试验的结果,可以评估触头寿命指标。

根据触头材质、触头切换电流与最大额定通过电流的比值、触头最大烧损量与允许烧损量的比值和切换次数,可以估算出触头的电气寿命值(次数)。

$$N = \left(\frac{I_1}{I_N} \right)^\alpha \left(\frac{V_N}{V_1} \right) N_1 + \left(\frac{I_2}{I_N} \right)^\alpha N_2 \quad (25-13)$$

式中 I_1 ——工作负载切换试验触头切换电流,A;

I_2 ——开断容量试验触头开断电流,A;

I_N ——触头最大额定通过电流,A;

V_N ——触头允许烧损量,cm³;

V_1 ——工作负载切换试验时触头最大烧损量,cm³;

N_1 ——工作负载切换试验次数;

N_2 ——开断容量试验次数;

α ——触头材质烧损指数,其值为 $1 \leq \alpha \leq 2$ 。若触头采用E-Cu材质, $\alpha=2$;若触头采用Cu-W合金材质(W占60%以上),其 $\alpha=1$ 。

触头的寿命指标、燃弧时间除与触头材质有关外,还与触头的焊接质量有关。为了保证触头焊接质量,往往采用图25-43所示的超声波探伤仪进行焊接质量的检测。

由于切换试验成本较高,所以分接开关大多只进行5万次的触头寿命试验。为了考核触头寿命指标和烧损的裕度,往往可按图25-44试验线路进行模拟试验。

12.3.3 触头烧损的表面质量

触头在工作负载切换试验和开断容量试验后应认真检查触头烧损后的表面状况、烧损是否均匀、有无开裂或拉脱现象,并按图25-45所示的触头表面烧损程度分等标准,判别触头表面质量等级(均匀程度)。

综合上述评定项目,按表25-15和表25-16的各栏要求,分别填写切换试验评定表,从而判断切换试验项目是否合格。

12.4 试验线路

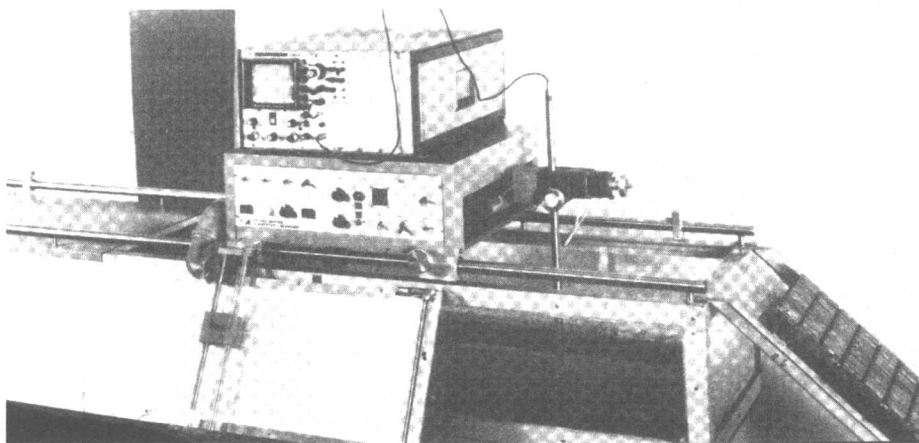


图25-43 触头焊接超声波探伤仪

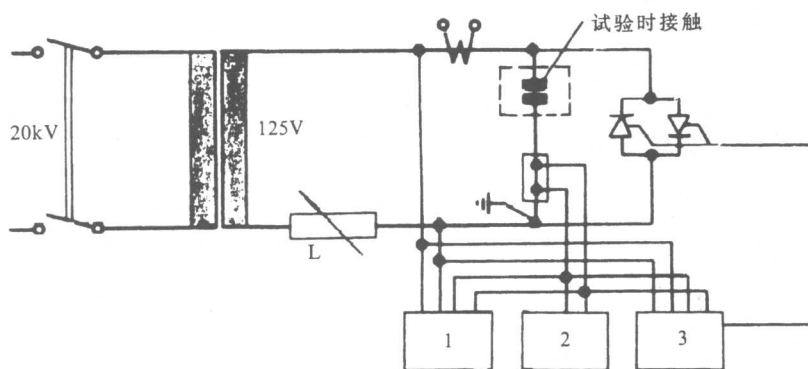


图25-44 触头寿命的模拟试验

1.燃弧时间计数器 2.电弧能量计数器 3.晶闸管计数器

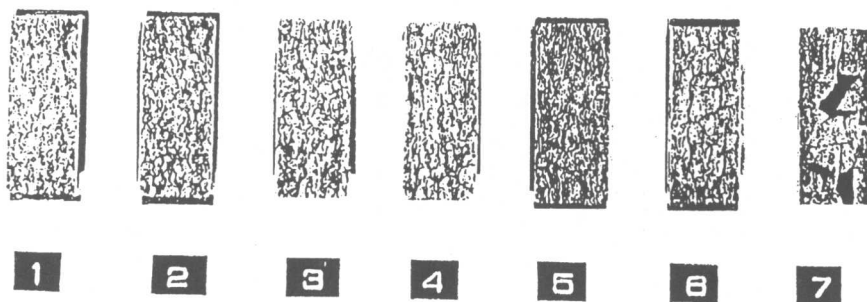


图25-45 触头表面烧损程度分等标准

工作负载切换试验和开断容量试验的线路一般是采用模拟试验线路。有载分接开关的实际工作条件,是通过分接引线与变压器绕组相连,并且在保持负载电流连续通过的情况下而进行分接变换的。且这一变换过程的回路现象与高压断路器有着本质的不同。分接开关的开断电流,不是单纯的负载电流,还有产生电弧部分的回路环流。断口间的恢复电压,也不是绕组的回路电压,而是级电

表25-15 工作负载切换试验评定表[Z Y1A(M)]

项		目	ZY1A-Ⅲ300		ZY1A-Ⅲ500	
额定工作负载		额定级容量/kVA	1 000		1 400	
		最大额定通过电流/A	300		500	
		相关级电压/V	3 300		2 800	
		过渡电阻匹配值/Ω	8		4.2	
电弧触头材料			E-Cu		Cu-W(W占65%)	
工作负载试验：5万次	主通断触头 燃弧时间 (ms)		示波图数量 n	比例(%)	示波图数量 n	比例(%)
		示波图总数	172	100	170	100
		0~10	168	97.7	170	100
		11~20	4	2.3	—	—
		21~30	—	—	—	—
		最大值	10.5		10	
	触头烧损 状 况	触头允许烧损量/cm ³	3.536		3.536	
		触头最大烧损量/cm ³	1.8		0.63	
		烧损比例/%	50.9		17.8	
		估计触头寿命	10万~20万次		30万~40万次	
		触头表面烧损质量等级	Ⅱ级		Ⅰ~Ⅱ级	
	油样	含水量或绝缘强度	≥30kV		≥30kV	
		含碳量/ml·100ml	≤6		≤6	
		其他性质指标	酸值、闪点无明显变化			

注：过渡触头燃弧时间不作考核。

表25-16 开断容量试验评定表[Z Y1A(M)]

开关规格	开断容量				触头		示波图 数 量	燃弧时间/ms				触头表面烧 损质量等级
	P/kVA	I/A	U_{a}/V	R/Ω				0~10	11~20	21~30	最大值	
ZY1A-Ⅲ300	2 000	600	3 300	8	主通断 触 头	n	201	196	5	—	11	Ⅱ
						%	100	97.5	2.5	—		
					过渡 触头	n	99	20	67	2	26	Ⅱ
						%	100	20.2	67.7	12.1		
ZY1A-Ⅲ500	2 800	1 000	2 800	4.2	主通断 触 头	n	202	194	8	—	11	Ⅰ
						%	100	96	4	—		
					过渡 触头	n	101	45	50	6	23.5	Ⅱ
						%	100	44.6	49.5	5.9		
		850	3 300	6.4	主通断 触 头	n	204	197	7	—	11	Ⅰ
						%	100	96.6	3.4	—		
					过渡 触头	n	102	25	69	8	24	Ⅱ
						%	100	24.5	67.6	7.8		

压和过渡电阻回路上压降的相量和。因而,模拟一个和开关实际回路条件一致的切换试验线路,从回路条件等价性考虑,切换试验线路不外乎有四种方法:电阻法、变压器法、补偿法和谐振法。前两种方法是已被 IEC214 推荐标准验证过的模拟线路。后两种方法是目前国外有的分接开关制造厂家(例如德国MR公司)采用的模拟线路。

12.4.1 电阻法模拟试验线路

电阻法模拟试验线路如图25-46所示。功率分配器的电阻器，其阻值计算应使用在变换的全过程中出现在4个触头上的计算电流和电压。旗循环双电阻过渡分接开关，其阻值最为严重情况时的计算公式如下：

$$R_1 = \frac{U_s(U_s - U_1)}{I_4(U_s - U_4) + U_2 I_2}$$

$$R_2 = \frac{U_s(U_1 - U_2)}{I_4(U_s - U_4) + U_2 I_2} + \frac{U_s}{I_4(U_s - U_4)}$$

$$\frac{U_2 I_2 (U_s - U_2)}{I_4(U_s - U_4) + U_2 I_2}$$

$$R_3 = \frac{U_s}{I_4} \cdot \frac{U_2 - U_4}{U_s - U_4}$$

$$R_4 = \frac{U_s}{I_4} \cdot \frac{U_4}{U_s - U_4}$$

$$R_5 = \frac{U_1}{I_1} - \frac{U_1(U_s - U_1)}{I_4(U_s - U_4) + U_2 I_2}$$

$$R_6 = \frac{U_2}{I_2} - \frac{U_2(U_s - U_2)}{I_4(U_s - U_4)}$$

$$R_7 = \frac{U_s}{I_3}$$

$$R_8 = \frac{U_3}{I_3} \cdot \frac{U_s}{U_s - U_3}$$

其中： I_1 为主通断触头W开断电流； I_2 为过渡触头X开断电流； U_1 为主通断触头W上的恢复电压； U_2 为过渡触头X的恢复电压； I_3 为过渡触头Y的承载电流； I_4 为主通断触头Z的承载电流； U_3 为过渡触头Y上的施加电压； U_4 为主通断触头Z上的施加电压。

为了符合切换试验规定的条件，并考虑电源阻抗影响，出现在触头上的电流和电压应予以校对，必要时将 R_1 值减小，以便进行调节。

12.4.2 变压器法模拟试验线路

变压器法模拟试验线路如图25-47所示。

为了符合切换试验规定的技术要求，并考虑到线路和电源阻抗的影响，在4个触头

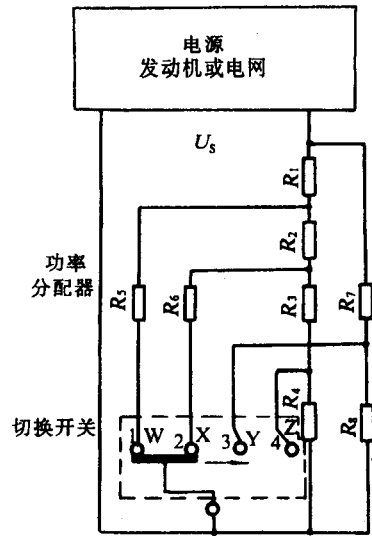


图25-46 电阻法切换试验的模拟试验线路
W、Z—主通断触头 X、Y—过渡触头 U_s —单相电源电压 $R_1 \sim R_8$ —构成功率分配器的电阻器

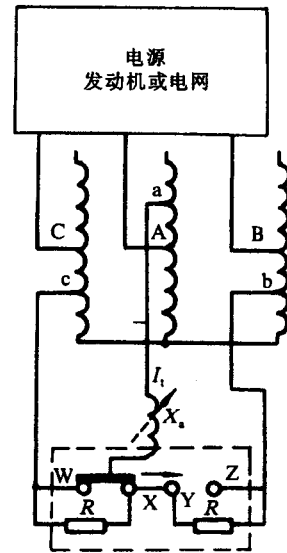


图25-47 变压器法切换试验的模拟试验线路
W、Z—主通断触头 X、Y—过渡触头 R —过渡电阻器
 X_s —可调电抗器 $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}$ —三相电源电压 I_t —试验电流，用 U_{BC} 和 X_s 来调节 U_{bc} —电流 I_t 的相关级电压

上出现的电流和电压应予以校对,必要时予以适当调节,例如改变电压 U_{bc} 、电抗 X_a 、 R 值和(或)改变电源电压相量的相互相位。如果没有专门的开关试验变压器时,一般试验变压器采用Yd5接线方式。它和实际情况很接近,如图25-48所示。这种接线方法,支撑边电压 U_{ac} 和 U_{bc} 较高,因而试验回路条件基本等价,但要求设备容量大。

12.4.3 补偿法模拟试验线路

补偿法模拟试验线路见图25-49。补偿法模拟试验线路是利用电容电流和电抗电流相位相反的原理,以抵消流经绕组中的电流,这就是电容补偿法。一般每一边电容器组可以补一半电流。因此,支撑边电流的瞬时值可达到零。而横臂bOc边仍有一半试验电流通过,而开断触头却得到所要求的电流值。采用这种方法可使试验变压器试验能力提高一倍。

12.4.4 谐振法模拟试验线路

谐振法模拟试验线路如图25-50所示。这种线路采用两台分接开关,一台被试开关,另一台陪试开关。或者采用一台开关的两相,如图中开关1、2,同时并联切换试验。在图示位置,由负载电抗和补偿电容所组成的等值电路如图25-51所示。由图25-51可以计算出:

$$i = \frac{(\omega^2 CL - 1)U}{\omega L} \quad (25-14)$$

此时,流过电抗器 L 的电流 i_2 应为试验负载电流 I_N 。

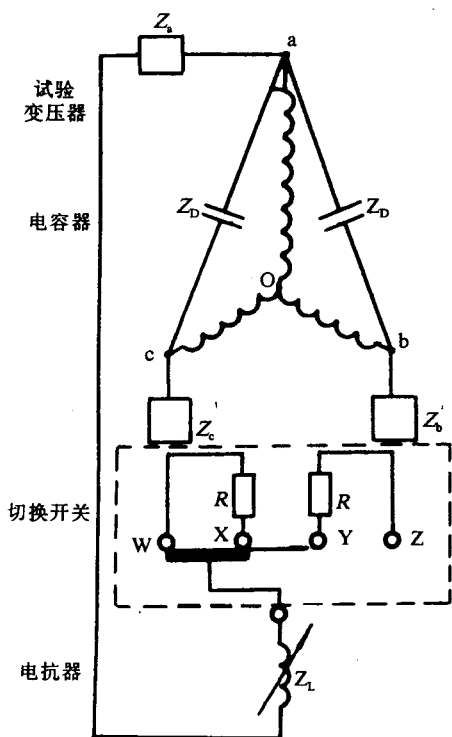


图25-49 补偿法切换试验的模拟线路

W、Z—主通断触头 X、Y—过渡触头 R—过渡电阻器 ZD—补偿电容器 Z_L —可调电抗器 Z_a 、 Z_b 、 Z_c —阻抗

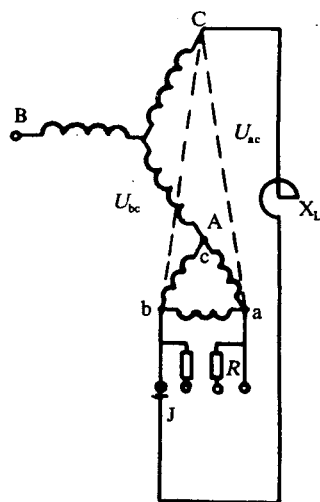


图25-48 Yd5试验线路

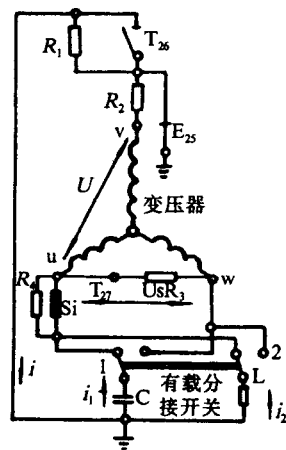
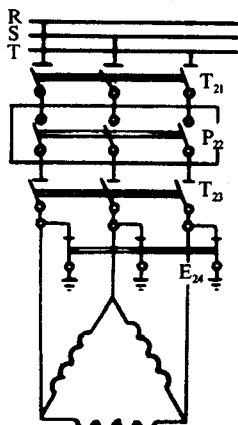


图25-50 谐振法切换试验的模拟试验线路

T_{21} 、 T_{23} 、 T_{26} 、 T_{27} —隔离开关 P_{22} —空气断路器 E_{24} 、 E_{25} —接地装置 R_1 、 R_2 —阻尼电阻 R_3 —变压器绕组过流保护电阻 Si —高压熔断器 R_4 —当熔断器开路时,防止线路开路的保护电阻

在 U 确定后, $L=U/\omega I_N$ 就给定了。当合理调整电容 $C=\frac{1}{\omega^2 L}$ 时,可以使 i 的瞬时值为零,且总电流 i 的相位总是垂直于电压 U 的。

采用这种试验线路时,绕组中只有切换过程中的暂态电流(循环电流)存在。且循环电流值比一个开关试验时增加一倍。由于 U_2 侧对一次侧的匝比关系数值较大,故一次侧反应并不强烈。

12.4.5 四种模拟试验线路的比较

从模拟试验线路的等价性和经济性两方面来讨论。

12.4.5.1 等价性

从模拟一个与开关实际回路条件等价的切换试验线路考虑,电阻法和变压器法的模拟试验线路优于补偿法、谐振法的模拟试验线路。

值得一提的是 L - C 谐振法在额定通过电流小于1 500A时,其线路条件等价性较好,试验结果能符合IEC214的规定。然而,在额定通过电流大于1 500A时,当过渡触头满足IEC214标准的触头任务时,主通断触头任务大大超出了标准要求。鉴于主通断触头的考核过于严格,此时采用 L - C 谐振法已不能令人满意。因此,可以采用改进的 L - C 谐振法模拟试验线路,如图25-52所示。改进的谐振法试验线路主要是在变压器的长臂绕组出线端考虑附加一特殊的限流电阻 R_x 。此电阻的串入或短接由两只晶闸管的控制装置来进行控制,要求在主通断触头接通时串入回路,而在过渡触头接通时短接。从而,使每一个触头任务符合IEC标准规定的要求,提高试验线路的等价性。对于额定通过电流大于1 500A时,适用补偿法模拟试验线路将是比较合适的。

12.4.5.2 经济性

从模拟试验线路经济性考虑, L - C 谐振法最佳,补偿法次之,变压器法还可以,电阻法最差。在额定通过电流1 500A负载下进行开断容量试验计算表明,电阻法所需供电容量为30 000kVA。变压器法为22 500kVA,补偿法为5 750kVA,谐振法仅为1 550kVA。显然,电阻法最大缺点是试验所需电源和电阻器消耗有功容量大,因而发热量很大,散热问题严重,同时,脉动的有功功率对电源的冲击也是很大。同样,变压器法的试验变压器需求容量也较大,试验线路中串入的电抗器要比分接开关过渡电阻大很多倍时,分断电流和恢复电压才接近实际情况,当 $X/R=6$ 时,才能使误差小于3%。谐振法最省,仅为电阻法的5%,具有明显的经济性。这不仅耗电少,而且对试验设备的投资大大节约。

综上所述,改进后的 L - C 谐振法模拟试验线路不仅等价性较好,而且经济性优越,是值得推广使用的切换试验线路。

13 过渡电阻器连续切换试验

过渡电阻器的连续切换试验是在1.5倍最大额定通过电流和相关额定级电压下进行,以确定它是否满足其过载的要求。应按产品上使用情况将电阻器安装在分接开关中。通过分接开关的操作使电阻器带负载,分接变换操作的次数相当于一个操作循环的一半。用电动机构在正常速度下不间断操作来试验。在最末的分接变换操作时记录并确定电阻器的温度。

在1.5倍最大额定通过电流下,电阻器对周围介质的温升:对于空气环境的分接开关,不应超过400K;对油介质的分接开关,不应超过350K。但是,电阻器和邻近它们的一些零部件的温度应限制到不影响组装件性能的数值。如果在实用上不能按上述办法来确定过渡电阻器的温度,则可采用等值法的模拟法来确定。

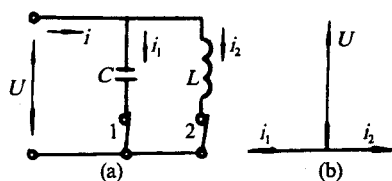


图25-51 L - C 谐振试验等值电路

(a)等值电路 (b)电流、电压相量图

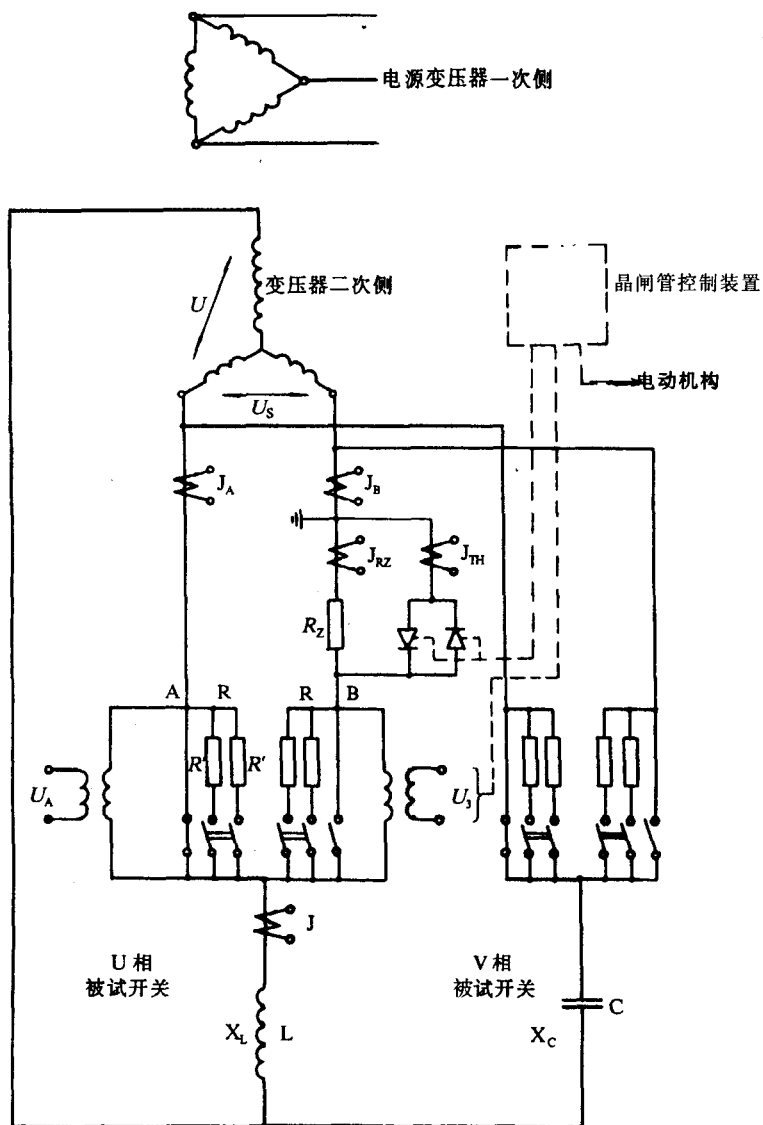


图25-52 改进后的谐振模拟切换试验线路装置

13.1 功率脉冲电流的等值法

功率脉冲电流确定过渡电阻器等值温度的方法进行步骤：

- (1) 把电阻器放置在分接开关中,或安放在一个便于安排对电阻材料进行测量的热等效的位置上,测量冷介质温度的热电偶或温度计位于电阻材料的最低点以下至少25mm地方。
- (2) 在试验开始时,测量并记录电阻材料和介质的温度。
- (3) 用电流 I_p 进行试验, I_p 的方均根值按如下求得：

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{K}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i^2 t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (25-14)$$

式中 I_i ——电流值,A;

t_i ——电流 I_i 的通流时间, s。

I_i 和 t_i 这两个量都是按工作负载切换试验的100张示波图记录取出来的平均值。

K 为系数,要选得与电阻器的试验条件相适应,考虑到应保持绝热现象,在5~10之间取值。

电阻器承受上述电流的次数应相当于一个操作循环的一半,电流作用的时间由下述公式决定:

$$t_p = K \cdot \sum_{i=1}^n t_i \quad (25-15)$$

(4)电阻器不通电流的休息时间应等于分接开关在两次连续操作之间能出现的最小间隔时间。

(5)峰值温度的决定,可能要用记录值进行外推。

13.2 模拟试验法

用模拟试验法来确定过渡电阻器温升的试验线路见图25-53。用模拟试验法来确定电阻器温升比IEC214第8.4.1条试验方法更加严格。

在负载转换期间,切换开关或选择开关的过渡电阻器承载有工作负载电流和循环电流,它取决于一个“重”(循环电流和以前的负载电流方向一致)或“轻”(循环电流和以前负载电流方向相反)的转换操作。因而切换开关或选择开关两侧电阻器负载在通过分接范围转换期间,从一次操作到另一次操作是不同的。

负载时间取决于切换开关的负载转换操作,在这个时间内所产生的热现象表现为电阻器材料完全吸收了热产生的热能。在随后的停载时间内,所储存的热量散发到周围的油中。电阻器承载所产生的热能是与分接开关额定参数(额定通过电流与额定级电压)、以及电阻器性能数据有关。在一次切换操作之后,电阻材料的温升如下:

$$\Delta T = \sum i^2 t \cdot \frac{\rho}{C\gamma} \cdot \frac{1}{A^2} \quad (25-16)$$

对于 $\text{Ni}_{80}\text{Cr}_{20}$ 的电阻材料, $\rho/C\gamma \approx 0.27 \text{Kmm}^4/\text{A}^2 \cdot \text{s}$ 。

在一次转换操作之后,电阻器材料按电阻器排列试验确定的冷却曲线而冷却。对此,该电阻器承受脉冲形式负载并且在过后的冷却状态期间,电阻器材料的温度由Cu-CuNi热电偶测试记录。借助以上操作转换所确定的温升以及电阻器冷却曲线,任意可以确定过渡电阻器温度曲线以及最大温升。一般过渡电阻器在3~5次的1.5倍 I_N 转换之后,可以达到最大的温升值。

表25-17所示是ZY1A(M)切换开关连续切换的过渡电阻温升。该温升是在电动机构所确定5.5s的额定转换程序的基础上,由一个相应的1.5倍额定通过电流下连续一个循环的一半测出的。

14 短路电流试验

所有不同设计分接开关的连续载流触头应承受短路电流的试验。每次持续时间为2s($\pm 10\%$)。

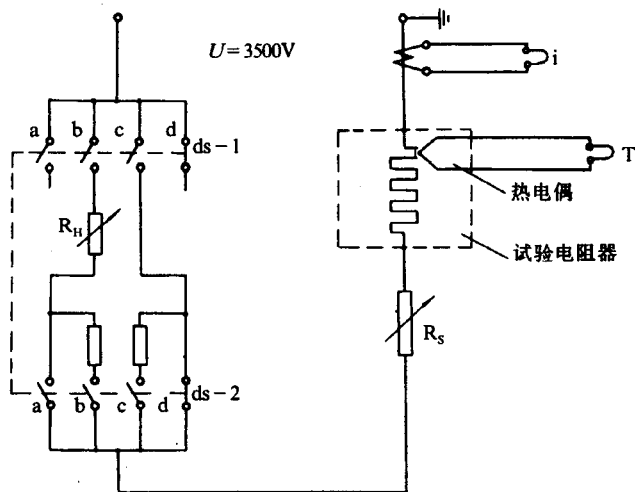


图25-53 模拟试验过渡电阻器温升的试验线路
ds-1—用于控制负载时间的切换开关 ds-2—用于 R_H 的接通和断开的切换开关 R_S 、 R_H —调节负载电流的电阻器

表25-17 ZY1A(M)切换开关过渡电阻连续切换的温升

开关规格	切换容量				过渡电阻截面 bh/mm^2	过渡电阻温升 /K
	P_N/kVA	I/A	U_q/V	R/Ω		
ZY1A-Ⅲ 300	1 000	I_N 300	3 300	8	4×0.4	重切换方向 $\Delta T=191.0$
						轻切换方向 $\Delta T=96.6$
	1 500	$1.5I_N$ 450A				重切换方向 $\Delta T=282.3$
						轻切换方向 $\Delta T=147.2$
ZY1A-Ⅲ 500	1 400	I_N 500	2 800	4.2	4×0.7	重切换方向 $\Delta T=216.2$
						轻切换方向 $\Delta T=107.1$
	2 100	$1.5I_N$ 750A				重切换方向 $\Delta T=318.2$
						轻切换方向 $\Delta T=147.4$

对于油浸式分接开关，应在变压器油中进行试验。除另有规定者外，凡三相分接开关，只试一相触头。试验线路见图25-54。三次试验的初始峰值电流应达到短路电流的方均根值的2.5(±5%)倍。在几次试验之间，不许移动触头。每两次试验间隔时间在油中为1min~2min，在空气中可在5min左右。

当无同期合闸设备，不可能达到上述要求时，可按如下试验方法：

增加短路试验电流的方均根值，使三次试验能达到峰值电流并减少试验的持续时间。当使用这个方法时，每次试验的持续时间如下：

$$t \geq \frac{2}{n^2} \quad (\text{s}) \quad (25-17)$$

式中 n ——试验电流增加的倍数。

施加的短路试验电流应符合图25-5的规定或者分接开关相应技术文件的规定。施加回路的开路电压至少应为50V。每次试验均用示波器记录试验电流波形和持续时间。

在实际短路电流试验中，往往把动热稳定试验分开进行。在热稳定试验中，只考核短路电流方均根值和持续时间响应。在动稳定试验中，侧重考核初始峰值电流，施加试验时间仅为0.1s，即五个周波电流。动热稳定试验后，触头不应有妨碍其在额定电流下连续正确工作的损坏，承载电流的其他一些零件不应有永久机械变形的痕迹。

15 触头温升试验

在运行中，连续承载电流的各式触头，应通以1.2倍最大额定通过电流进行试验。当触头温度达到稳定时，其对周围介质的温升应不超过20K的规定值。当周围介质为油时，试验应在室温下进行。周围介质的温度应在触头下面不小于25mm处进行测量。用热电偶或其他适当手段，放在触头的表面上并应尽量靠近实际接触点，以进行温度的测量。当触头与周围介质间温差变化在连续2h内，每

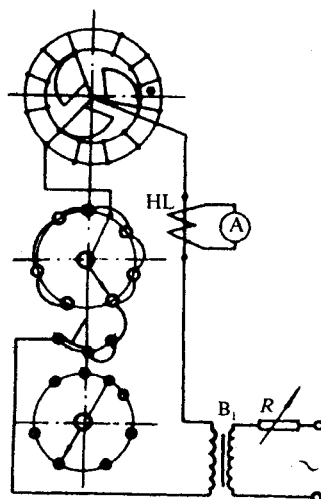


图25-54 分接开关温升及短路电流试验图
(试验一相)

HL—电流互感器 A—电流表 B₁—电源(电流)变压器 R—可调电阻

1h不超过1K时,则认为温度达到了稳定。

温升试验一般在机械和电气寿命试验前后各进行一次。试验之前,应测量被试触头接触电阻。试验线路是这样选择的,对切换开关、分接选择器(或选择开关)和转换选择器各选触头接触电阻最大者进行温升考核。测量触头温升的试验线路见图25—54。如有必要,可进行1.5倍最大额定通过电流下温升试验,以验证其过载能力。

16 特殊(研究)试验

特殊试验是指为了稳定、改进和提高分接开关的性能,研制新产品或进一步了解产品性能而进行的研究性试验,也包括用户对产品提出的特殊要求所进行的考核性试验。

下面介绍几项常见的特殊试验。

16.1 油室试验

16.1.1 超压保护试验

分接开关上通常采用爆破阀作为安全保护装置。其爆破压力随材料质量变化较大。为了控制在一定范围内,常需要进行一些破坏性试验。因此需要制作一个简单装置,该装置应特别考虑安全措施,避免发生人身和设备事故。

16.1.2 机械强度试验

分接开关油室的机械强度应大于压力释放装置的整定值要求,试验时给油室充油后逐渐增加压力,直至油室发生破坏,记录破坏时的压力值和破坏情况。

16.2 分接开关机械堵转试验

为防止分接开关发生机械堵转时产生较大机械损坏,分接开关上设置一薄弱环节。堵转时,薄弱环节先行断裂,使分接开关与电动机构脱离。试验时应记录断裂时的破坏力矩和断裂情况,也验证分接开关堵转时传动件承受能力。

第二十六章 冷却器试验

第一节 概 述

要把变压器的温升稳定在一定的数值,就必须要求变压器有一定的散热表面,这样才能有效地把变压器产生的热量散到周围的介质中去。然而变压器的损耗是随它的容量增大而增加,损耗的增加与容量的 $3/4$ 次方成比例,而冷却表面的增加只与容量的 $1/2$ 次方成比例。小容量变压器只需油箱及散热管片借自然冷却方式来散发热量。而大型变压器则需特殊的冷却装置,才能散发足够的热量。

冷却装置一般是可拆卸的。不是强迫油循环冷却装置称为散热器(自冷式和风冷式)。强迫油循环的称为冷却器(强油风冷式和强油水冷式)。现主要论述冷却器的检查试验。

冷却器的基本结构和工作原理如图 26-1 所示。

强迫油循环风冷却器(以下简称强油风冷却器),是用潜油泵强迫油循环,使油与冷却介质空气进行热交换的冷却器,其本体是一簇带有翅片的单金属或双金属翅片管与上下集油室焊接而成一整体。管内设置强化传热装置,单回路、大流量、低扬程、阻力小、噪声低。变压器风扇电机采用 8 极~16 极,可获得不同风量、风速下的冷却容量。每台风冷却器有分控制箱,每台变压器有总控制箱。

强迫油循环水冷却器(以下简称强油水冷冷却器)。它是用潜油泵强迫油循环,使与冷却介质水进行热交换的冷却器。其本体由圆形筒体和水箱构成,筒体中放置冷却铜管,铜管中通入冷却水;沿高度方向有

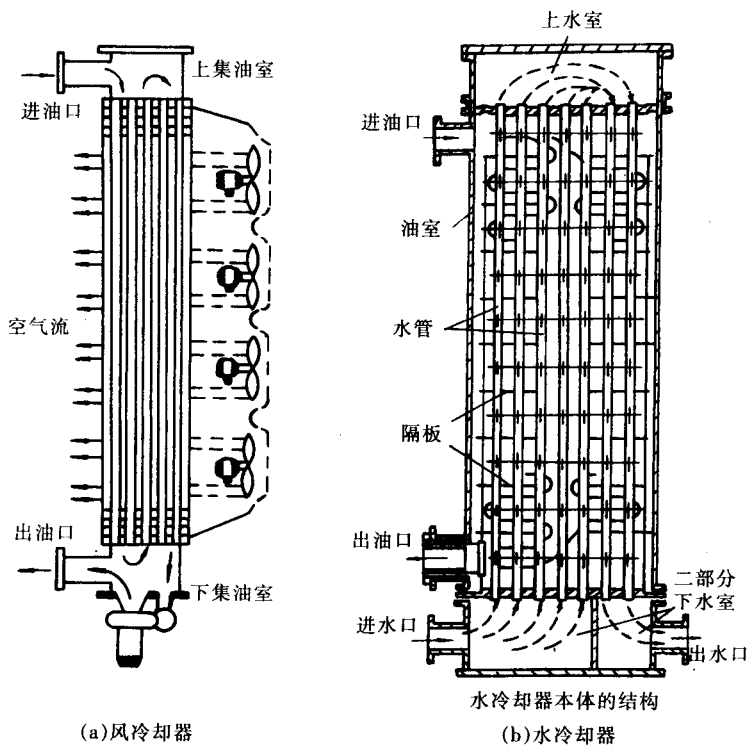


图 26-1 冷却器的结构原理图

隔板间隔,以改变油流路径,油流曲折在铜管缝隙中边流动边冷却。水流从下水室的一部分进入,沿着其连接的多管区上升到上水室,再从少管区向下流入下水室的另一部分而流出,呈“ \cap ”形流动。而油流流入油室,在管簇的空间从上往下流,且被横隔板拉长,呈“S”形流动。这样,形成的油水热量交换的冷却系统,使变压器油充分冷却。潜油泵安装在水冷却器的入口侧,使冷却器的油压大

于水压,防止水渗漏入油中。差压继电器装在油回路和水回路之间,即其高压侧接到油出口处,低压侧接到进水口处。每台变压器配有总控制箱。

第二节 技术要求和参数

众所周知,变压器的电气寿命决定于绝缘材料的耐热等级。A级绝缘材料最高工作温度是 105°C ,变压器油到 95°C 就劣化。基于这些因素,国家标准 GB1094.2—1996 规定绕组温升 65K 和最高环境温度 40°C ,是以 A 级绝缘等级为基础提出的。 $65+40=105^{\circ}\text{C}$,这是变压器绕组的极限工作温度。而油顶层温升 55K ,因此油顶层温度是 $55+40=95^{\circ}\text{C}$ 。

然而,对于冷却方式为强迫油循环的变压器,为了保证绕组最热点温度不超过 98°C ,油顶层温升则不应超过 40K ,即油面最高温度是 $40+40=80^{\circ}\text{C}$,油对空气的平均温升为 35K ,绕组对油的平均温升为 $25\text{K}\sim 30\text{K}$ 。

从这个基本要求出发,冷却器的设计和制造就有了依据。

1 强油风冷却器

1.1 技术参数

环境温度: $-30^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

在冷却器进口油温与进口风温之差为 40K 时,在额定油流量和额定空气流量下,所具有的冷容量称为额定冷容量。

冷却器规格按额定冷却功率分为:63、80、100、125、160、200、250、315、400kW。

其设计工况点是:进口风温 20°C ,进口油温 60°C 。声级不大于 $76\text{dB}\sim 78\text{dB}$ 。

1.2 技术要求

冷却器整体结构应能承受真空试验,绝对压强小于 65Pa ,持续时间为 10min ,不得有永久变形和损伤。

冷却器油系统和所有密封元件应能耐受 105°C 变压器油。

冷却器整体须经 0.5MPa 油压试验。油温 $80^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$,历时 6h ,无渗漏油现象。

冷却器应用不低于 70°C ,耐压值不低于 35kV 的热油进行清洗,每隔 2h 检查一次,至无异物存留为止。

1.3 典型风冷却器的技术数据

YF 型为户外式,环境温度为 $-30^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$,最高油温(进口油温)为 80°C 。几种风冷却器的技术数据见表 26-1。

2 强油水冷却器

2.1 技术参数

冷却器结构由冷却器本体、油泵、油管路、水管路和电气控制等部分组成。

冷却器规格按额定冷却功率分为:30、50、63、80、100、125、160、200、250、315、400、500kW。

新出厂的冷却器在表 26-2 规定的额定值下,应具有一定的储备功率,一般为 25% 以上。

2.2 技术要求

使用条件,环境温度在 0°C 以上,冷却水中没有强腐蚀性介质、泥沙和其他污物。

冷却管和两端管板联接处应能承受 500kPa 的压力 1h 无渗漏。

水管路系统应能承受 500kPa 的压力,持续 2h 的密封试验,无渗漏和变形。

油管系统应能承受 500kPa 的压力,持续 6h 的密封试验,无渗漏和变形。

冷却器应能承受真空残压不大于 65kPa 的压力,稳定 10min ,不得有机械损伤和永久变形。

表 26-1 风冷却器技术数据(按环境温度 40℃)

技术数据	YF					YFP	CYF
	-60	-80	-100	-120	-180	-200	-300
额定冷却容量/kW	60	80	100	120	190	200	300
额定油流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	40	20	20	40	80	150	150
油泵功率/kW	3	2.2	3	3		4	4
油泵扬程/kPa	157	186	186	157		58.8	58.8
油泵转速/rpm	1 450	1 450	1 450	1 450		1 450	1 450
电扇数/台	2	3	4	4	2	2	3
风扇功率/kW	0.4	0.4	0.4	0.4		1.5	1.5
风扇转速/rpm	1 450	1 450	1 450	1 450		960	960
风扇风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	6 500	5 600	5 600	5 600	16 000	16 000	16 000
风压/Pa	121.6	144	144	144		215	215
油量/kg	120	122	130	140	120	87	167
总质量/kg	660	800	1 000	1 160	1 250	1 621	1 833

表 26-2 水冷却器性能参数

项 目		参 数
额定冷却功率/kW		30~500
最高许用水压/kPa		50
油水压差(出口油压大于入口水压)/kPa		50
油 温	输入/℃	70
	输出/℃	62~65
水温(输入)/℃		30
最大油流速/m·s ⁻¹		2

表 26-3 YS₁型水冷却器技术数据

技术数据	YS ₁			
	-80	-120	-160	-300
额定冷却容量/kW	80	120	160	300
有效冷却面积/ m^2	9.74	13.5	18.6	39.3
额定水流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	12	12	12	30
额定入口水温/℃	25	25	25	25
额定油流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	45	45	45	90
额定平均油温/℃	65	65	65	65
最小油水压差/kPa	58.8	58.8	58.8	58.8
最高许用水压/kPa	68.6	68.6	68.6	68.6
油泵功率/kW	4	4	4	10
充油量/kg	68	85	115	250
充硅胶量/kg	10	17	25	45
充水量/kg	40	50	65	
单台总质量/kg	450	500	650	1 250

注:Y—强迫油循环;S—水冷却

差压信号器当油压与水压之差小于 50kPa 时应报警。正常情况下油压大于水压 58.8kPa。

冷却器组油管路系统(包括阀门)的密封元件应能耐受 105℃的变压器油。

冷却器油路系统应用 70℃以上,耐压 35kV 的热油进行清洗,每隔 2h 检查一次至无异物,进出口油耐压值不变。

2.3 水冷却器性能参数(见表 26-2),YS₁型水冷却器技术数据(见表 26-3)

环境温度为 0℃~40℃,进口水温为 25℃,进口水温每增加 1℃,冷却容量减小 2%。

第三节 强油风冷却器试验

试验应依据 JB/T 8315—1996 标准进行。

试验分为例行检查试验和型式试验。型式试验在下述情况下进行:a.新产品试制;b.当工艺、材料的变更足以引起某些基本参数变化时;c.正常生产的产品每五年进行一次。

例行检查试验项目有:a.外观检查;b.渗漏试验;c.运行试验;d.电气强度试验;e.热油清洗。

型式试验项目有:a.真空强度试验;b.声级试验;c.冷却容量试验。

1 外观检查

结构安装应符合图纸要求,表面处理合乎技术要求,冷却管内无金属粉末锈蚀,油系统所有密封元件,应能耐受 105℃ 变压器油。

2 渗漏试验

冷却器整体须经 0.5MPa 油压试验。油温 80℃~90℃,历时 6h,无渗漏现象。可用试漏显像液、活性白土等方法,检查各连接处是否渗漏。

3 运行试验

将冷却器安装在专用试验装置上,在常温下,测量额定油流量下的冷却器油阻力降,其值应符合设计要求。运行试验时保证风扇、油泵转向正确,运转平稳。油流继电器指示及发出信号应正确,可靠。热继电器不应动作。运行时间应不小于 1h。

4 电气强度试验

油泵、风扇及电缆的供电相间及对地,应能承受 1 600V 工频耐压试验 1min。控制箱内 380V 回路相间及对地应能承受 2 500V 工频耐压试验 1min。控制箱内 220V 回路及油流继电器对地应能承受 2 000V 工频耐压试验 1min。

5 热油清洗

冷却器在竖直状态下,用 70℃~85℃ 的变压器热油(耐压值不低于 35kV)进行清洗,清洗时间 24h 以上,至无异物存留为止。用磁性搜集法或用其他有效方法进行清理铁沫和杂物。

6 真空强度试验

冷却器整体结构应能承受绝对压强小于 65Pa、持续时间 10min 的真空试验,不得有永久变形和损伤。用热偶真空计测量真空度及大气压力,计算出绝对压强。试验时应逐渐提高真空度。

7 声级试验

声级测定的位置及高度见图 26-2,先计算出高度为 H_1 时的 7 个测点的声级算术平均值 L_1 ,再计算出 H_2 时 7 个测点的声级算术平均值 L_2 ,则 $L=(L_1+L_2)/2$ 即为冷却器的实测声级值。但必须根据环境噪声,对冷却器声级值作必要的修正。

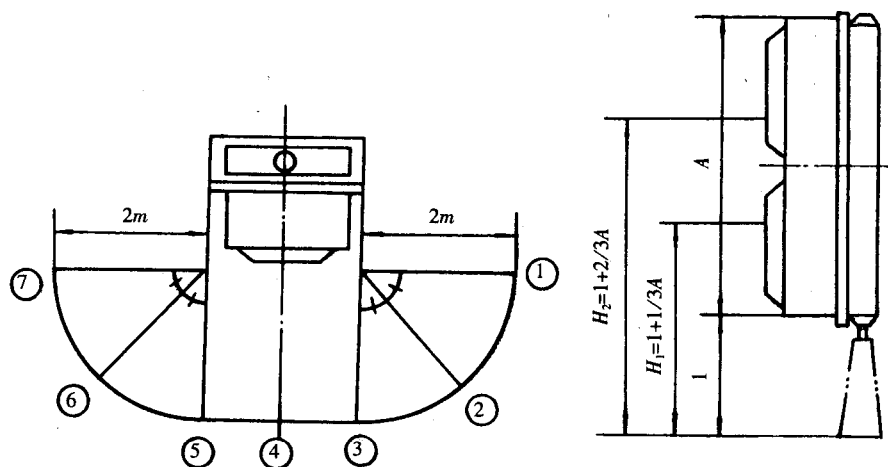


图 26-2 声级测定位置及高度

1—近似于冷却器运行高度 A—冷却器总高度

8 冷却容量试验

按照规定的进口油温、进口风温,做出油流量与冷却容量的特性曲线,测量点不少于5点。例如0.5倍、0.7倍、0.9倍、1.0倍和1.2倍额定流量下的冷却容量。

8.1 试验系统(见图 26-3)

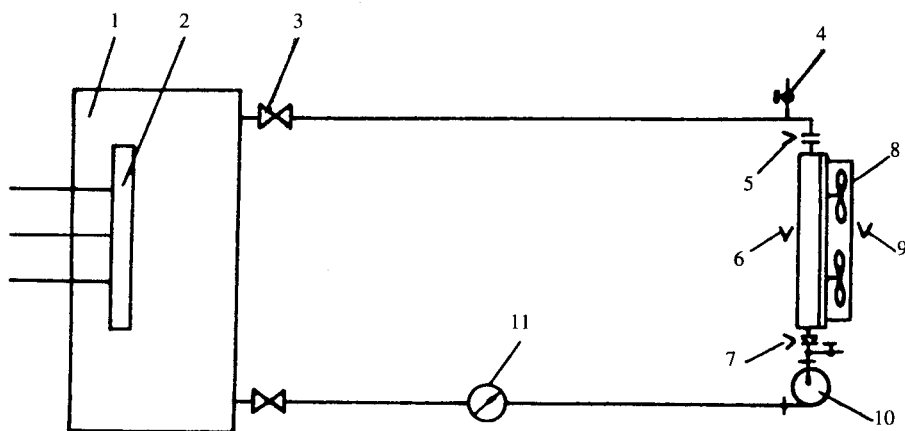


图 26-3 冷却容量试验系统示意图

1—油箱 2—加热元件 3—阀门 4—测压阀 5—油入口热电偶 6—空气入口热电偶
7—油出口热电偶 8—被试冷却 9—空气出口热电偶 10—油泵 11—流量计

8.2 试验条件

(1)施加额定电压,使风扇及油泵在额定转速下运转;

(2)调节进油温度与进风温度之差,使二者温度差稳定在 $40\text{K} \pm 2\text{K}$ 范围内的某一个固定值,温度差波动允许在 1h~2h 内变化 0.5K 。

8.3 测量方法

8.3.1 进口风温的测量

在距冷却器进风口 200mm 左右处,将冷却器按风扇数量分为几个区域,每个区域以冷却器 $1/2$ 宽度为半径,均匀分布取 4 个点,用热电偶进行测量。取 4 个点的算术平均值,作为该区的平均进口风温,将几个区的平均进口风温的算术平均值,作为冷却器的进口风温。

8.3.2 出口风温的测量

在距冷却器出风口处,不超过 20mm 处平面上测量;将冷却器按风扇数量分为几个区域;每个区域按风叶直径分为两个圆环;圆环直径分别为 D 、 $D/2$ (D 为风叶直径);每个圆环上均匀分布地取 4 个点,用热偶进行测量,取各测点的算术平均值,作为每个区域的出口风温,取各个区域的出口风温的算术平均值,作为冷却器的出口风温。

8.3.3 冷却器的试验安装位置

冷却器后面面对加热器油箱面约 600mm~800mm,下集油室底部至地面约 800mm~1200mm。冷却器是垂直放置。

8.3.4 冷却器的测量及验证

冷却容量的测量计算按式(26-1):

$$P = P_1 - P_2 \quad (26-1)$$

式中 P ——实际冷却功率, W;

P_1 ——加入加热油箱的总功率, W;

P_2 ——油箱及管路元件消耗功率, W。

冷却容量验证按式(26-2):

$$P_y = \frac{Q_y \rho_y C_y (t_y' - t_y'') \times 10^{-6}}{3.6} \quad (26-2)$$

式中 P_y ——油侧功率, W;

Q_y ——试验时油流量, m^3/h ;

ρ_y ——平均油温 $[\frac{1}{2}(t_y' - t_y'')]$ 时的变压器油密度, kg/m^3 ;

C_y ——平均油温 $[\frac{1}{2}(t_y' - t_y'')]$ 时变压器油的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

t_y' ——进口油温, $^{\circ}\text{C}$;

t_y'' ——出口油温, $^{\circ}\text{C}$ 。

如果 $\frac{|P - P_y|}{P} \leq 5\%$, 说明试验基本正确, 否则应查明原因, 重新试验。

8.3.5 冷却容量的换算

如果做冷却容量试验时, 进口油温与进口风温的温度差不是 40K 时, 可按式(26-3)进行换算:

$$P_{40} = P \frac{40}{t_y' - t_f'} \quad (26-3)$$

式中 P_{40} ——当 $t_y' - t_f' = 40\text{K}$ 时的冷却容量, W;

t_y' ——进口油温, $^{\circ}\text{C}$;

t_f' ——进口风温, $^{\circ}\text{C}$ 。

换算后的冷却容量(为合格的) P_{40} 应不小于标称额定冷却容量的 95%。

8.4 冷却器油路压降测试

油路压降值按设计规定, 并做出油流量与油路压降的特性曲线, 测量点不少于 5 点。

在图 26-3 中的冷却器油路进出口端, 连接 U 形水银差压计, 在油温 $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 时, 读取差压计的数值 Δh , 则油路压降按式(26-4)计算

$$\Delta P_y = (\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{oil}}) g \Delta h \quad (26-4)$$

式中 ΔP_y ——冷却器的油路压降, Pa;

ρ_{Hg} ——水银 60°C 时的密度, kg/m^3 ;

ρ_{oil} ——变压器油 60°C 时的密度, kg/m^3 ;

Δh ——水银柱高度, m。

8.5 冷却器风路压降的测试

用“热球式电风速计”测量每个风扇出风口的平均风速, 并测量进出口风温 t_y' 、 t_y'' 和出风口面积, 计算出风量 Q_f , 并用风扇的特性曲线查出全风压 ΔP_0 , 风路压降可按式(26-5)计算。

$$\Delta P_f = \frac{\Delta P_0 \times \rho_f}{\rho_0} \quad (26-5)$$

式中 ΔP_f ——冷却器的风路压降, Pa;

ΔP_0 ——从风扇特性曲线查出的全风压, Pa;

ρ_0 ——标准状态下的空气密度, kg/m^3 ;

ρ_f ——风温为 $(t_y' - t_y'')/2$ 时所对应的空气密度, kg/m^3 。

第四节 强油水冷却器试验

试验应依据 JB/T 8316—1996 标准进行,试验分为出厂试验和型式试验。

出厂试验项目有:a.操作试验;b.密封强度试验;c.压差保护试验;d.清洁度处理;e.控制系统试验。

型式试验项目包括:a.真空强度试验;b.冷却功率试验。

1 操作试验

冷却器操作试验是将冷却器装在试验台上,连接油水管路,接通控制箱电源进行操作运行。连续运行 2h 无渗漏。

2 密封强度试验

(1)冷却管和两端管板联接处应能承受 500kPa 的压力 1h 无渗漏。

(2)水管路系统应能承受 500kPa 的压力,持续 2h 密封试验,无渗漏和变形。

(3)油管路系统应承受油温 70℃,压力 500kPa,持续 6h 的密封试验,无渗漏。

如果施加水压后,要将冷却器进行干燥处理。

3 压差保护试验

在操作试验中进行,当油水压差小于 50kPa 时应报警。正常情况下油压大于水压 58.8kPa。

4 清洁度处理

冷却器油路系统应用 70℃以上,耐压 35kV 的变压器油进行清洗,时间至少 8h 至无异物,进出口变压器油耐压值不变。

5 控制系统试验

按 GB4720 进行。

6 真空强度试验

冷却器应能承受真空残压不大于 65Pa 的压力,稳定 10min,不得有机械损坏和永久变形。

7 冷却容量试验

冷却容量试验是最重要的试验项目,它是关系到冷却器的定型及是否符合设计要求的试验。

(1)冷却容量值按表 26-2 的规定。

(2)试验系统可参照图 26-4。

(3)试验方法

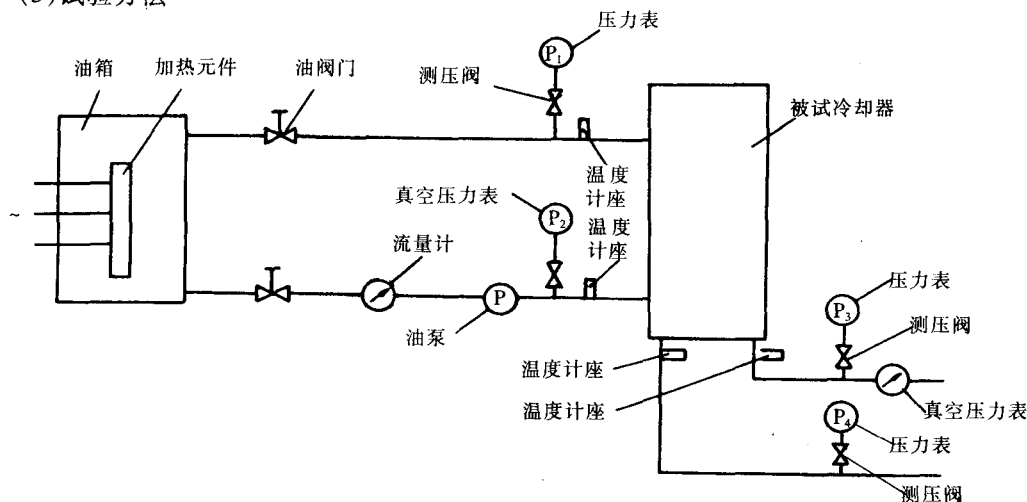


图 26-4 冷却容量试验系统

①施加额定电压,启动油泵,用电偶或水银温度计测量进、出口油温和水温。

②调节进口油温与水温之差,使二者温度稳定在 $40\text{K}\pm 2\text{K}$ 范围内的某一个固定值,温差允许在 1h~2h 范围内变化 0.5K。

(4)在四种不同水流量(为额定值的 0.6、0.8、1.0 和 1.2 倍时)分别测取 0.7、0.9、1.0、1.2 和 1.4 倍额定油流量下的冷却容量,并做出油流量—冷却容量曲线。

①油侧冷却容量按式(26-6)计算

$$P_y = \frac{Q_y C_y \rho_y (t_y' - t_y'') \times 10^{-6}}{3.6} \quad (26-6)$$

式中 P_y ——油侧功率, kW;

Q_y ——试验时油流量, m^3/h ;

ρ_y ——平均油温 $[\frac{1}{2}(t_y' + t_y'')]$ 时的变压器油密度, kg/m^3 ;

C_y ——平均油温 $[\frac{1}{2}(t_y' + t_y'')]$ 时变压器油的比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

t_y' ——进口油温, $^{\circ}\text{C}$;

t_y'' ——出口油温, $^{\circ}\text{C}$ 。

②水侧冷却容量按式(26-7)计算

$$P_a = \frac{Q_a C_a \rho_a (t_a' - t_a'') \times 10^{-6}}{3.6} \quad (26-7)$$

式中 P_a ——水侧功率, kW;

Q_a ——试验时的水流量, m^3/h ;

ρ_a ——平均水温 $[\frac{1}{2}(t_a' + t_a'')]$ 时水密度, kg/m^3 ;

C_a ——平均油温 $[\frac{1}{2}(t_a' + t_a'')]$ 时水的比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;

t_a' ——进口水温, $^{\circ}\text{C}$;

t_a'' ——出口水温, $^{\circ}\text{C}$ 。

③冷却容量的验证

测得的 P_y 、 P_a 应满足式(26-8)要求

$$\frac{|P_y - P_a|}{P_y} \leq 5\% \quad (26-8)$$

否则应重新试验。

④冷却容量的确定按(26-9)

$$P = \frac{P_y + P_a}{2} \quad (26-9)$$

⑤额定冷却容量的确定按(26-10)

$$P_N = P \cdot \frac{40}{t_y' - t_a'} \quad (26-10)$$

第五节 与试验有关事项

1 加热装置和油箱

不论强油风冷却器或强油水冷却器做冷却容量试验时必须要有加热油箱。加热元件可用电阻

丝绕制,供三相 380V 电源,一般做成 400kW,可以试 300kW 以下的冷却器。油箱 1.5m×1.8m×4m,可装 10 吨油。油箱上安装储油柜、油标、测量油流量装置和进出口阀门。并备有循环油泵,供油上下流动,使温度均匀。

另外要有 250kVA 电源及调压器,以及测量功率,试验操作桌,以供随时调节和测量。

2 足够的水源

做水冷却器冷却容量试验时,需耗费很多水,特别是 YS1-300,每小时 30t 水,做 5h~8h 试验,需要 240t 左右水。如果有储水池,可以冷却处理,反复使用,这样就能节约大量的水。

3 流量计

测量水的流量用一般的水流量计即可。

而测量油的流量用蜗轮流量变送器。

表 26-4 试验油箱散热功率与油平均温差对照表

$T_{\text{т}}$	P_0	$T_{\text{т}}$	P_0	$T_{\text{т}}$	P_0	$T_{\text{т}}$	P_0
20	7.13	33	12.9	46	19.5	59	26.7
21	7.28	34	13.4	47	19.9	60	27.2
22	7.95	35	13.9	48	20.6	61	27.7
23	8.2	36	14.3	49	21.3	62	28.3
24	8.63	37	14.9	50	21.7	63	28.9
25	9.17	38	15.4	51	22.1	64	29.5
26	9.6	39	15.9	52	22.7	65	30
27	10	40	16.4	53	23.3	66	30.6
28	10.5	41	16.9	54	23.8	67	31.2
29	11	42	17.4	55	24.4	68	31.8
30	11.4	43	18.1	56	24.9	69	32.4
31	11.9	44	18.5	57	25.6	70	33
32	12.5	45	19	58	26.1	71	33.6

第六节 实 例

YS1-120 水冷却器,其参数为:

额定油流量:45m³/h

额定水流量:12m³/h

扬程:19m

最高油温(入口):65℃

油泵 YB45-19/4

流量:45m³/h

扬程:19m

试验结果:

(1)油流量:40m³/h(依设计联系单)

(2)水流量:12m³/h

(3)保持:入口油温-入口水温=40℃

实际: 51℃-11.5℃=39.5℃,接近 40℃要求

(4)最后温度:

入口油温:51℃

出口油温:44℃

入口水温:11.5℃

出口水温:20.5℃

室 温:13.5℃

(5)电源情况(施加于加热装置的):

V×1	I×120	W×120×1×10
294	2.5, 2.5, 2.5	68+61

功率为 $P_1=129 \times 1\ 200=155\ 000\text{W}=155(\text{kW})$

查出油箱散热功率:

油箱平均温升 $\frac{51+44}{2}-13.5=34(^\circ\text{C})$

34℃时油箱散热功率为 13.4kW, 则冷却器的散热功率 $P=155-13.4=141.6(\text{kW})$, 符合铭牌要求。如果提高油流量为 45m³/h, 则冷却功率就更大。所以冷却器有一定的储备散热能力。

(6)油泵压力:

油进口:19.6kPa

油出口:155kPa

(7)油水压差:

油压-水压 1.3-0.3=1kg/cm²=98(kPa)

进口水压约 58.8kPa

(8)加热电源:

用 5 000kVA 100V 发电机, 1 900/600V Y/Δ 中间变压器。

(9)核算

①水的散热

水出入温差 20.5-11.5=9(℃)

$$P_a = \frac{Q_a C_a \rho_a (t_a' - t_a'')}{860} = \frac{12 \times 1 \times 1\ 000 \times 9}{860} = 125.5(\text{kW})$$

其中, $Q_a=12\text{m}^3/\text{h}$, $C_a=1$ 千卡/kg·℃, $\rho_a=1\ 000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

②油的散热功率

$$P_y = \frac{Q_y C_y \rho_y (t_y' - t_y'')}{3.6} = \frac{40 \times 0.441 \times 862 \times 7}{860} = 124(\text{kW})$$

油位差 $t_y' - t_y'' = 51 - 44 = 7^\circ\text{C}$

$\rho_y = 862\text{kg}/\text{m}^3$

$C_y = 0.441$ 千卡/kg·℃

由此可知, 油带出的热量功率为 124kW, 被水吸收带走 125.5kW, 基本上是一致的。

(10)油对水的平均温升:

油入口处对水温升 51-11.5=39.5K

油出口处对水的温升 44-11.5=33.5K

油对水的平均温升 $\frac{39.5+33.5}{2}=36.5\text{K}$

第七节 油流继电器的原理及试验

油流继电器(见图 26-5)是监视强油风冷却器或水冷却器中油泵是否反转、阀门是否打开和油流是否正常的保护装置。它安装在冷却器和油泵之间的连管上, 其挡板伸入到连管中。当连管中油

流达到一定值时挡板被冲动,传动轴旋转,其上磁铁心带动隔着薄板的另一磁铁而转动,微动开关的常闭接点 a_2 打开,常开接点 a_1 闭合,发出正常工作信号,指针指到流动位置。反之,当油减小到一定值时,挡板借弹力作用返回,微动开关发出故障信号。

油流继电器的动作试验:

油流继电器的动作特性见表 26-5。

(1)试验系统见图 26-6。

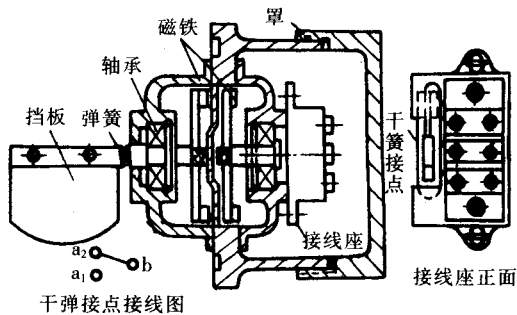


图 26-5 YJ 型油流继电器的结构

表 26-5 油流继电器动作特性			
型 号	额定工作油流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	动作油流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	返回油流量 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
YJ-50/20	20	$15 \pm 10\%$	$11 \pm 10\%$
YJ-80/40	40	$30 \pm 10\%$	$22 \pm 10\%$
YJ-100/90	90	$68 \pm 10\%$	$50 \pm 10\%$
YJ-150/80	80	$55 \pm 10\%$	$44 \pm 10\%$
YJ-150/135	135	$101 \pm 10\%$	$75 \pm 10\%$

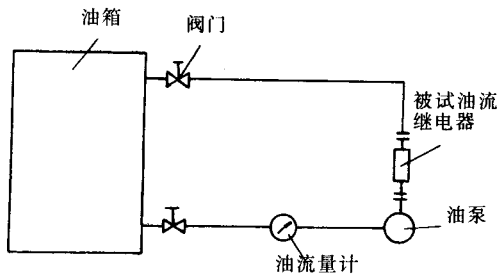


图 26-6 试验系统

(2)信号测量,可用万能表或灯光。

(3)调节油量试验。

把上下阀打开,开动油泵,让其运转几分钟,驱净管路空气,测量油流量,观察信号灯的变化。

如果油流量达到规定值时未冲转挡板,可以停泵,再次开泵冲击。冲开后再减小油流量,观察信号是否回复。如果达到要求,即认为合格。

当挡板冲不动,或不能回复,则要卸下来检查。挡板装置安装是否灵活,轴承是否卡住,弹簧的弹性是否够。检查后再复试。

第八节 控制箱在冷却器试验中的动作功能试验

由于冷却器运行状况关系到变压器能否正常运行,因此要有控制箱对冷却器运行进行监控。现以强油风冷却器控制线路为例,来说明其动作功能试验如何进行。

首先要了解其特点。整个冷却系统有两个独立电源,一个工作电源,一个备用电源。每个冷却器用控制开关手柄位置来选择工作状态(工作、辅助或备用)。按变压器负荷情况自动投入或切除相应数量的冷却器。当变压器顶层油温达到规定值时,自动启动尚未投入运行的辅助冷却器。当冷却器发生故障时,能发出事故信号,能自动启动备用冷却器。冷却器的油泵电动机和风扇电机设有过负荷、短路及断相运行保护。

为了验证控制箱接线的正确性,可与冷却器配合来检验,也可单独检验。主要了解各部分控制下的继电器、接触器、信号灯的动作的正确性。现介绍不接冷却器只试控制箱的过程。

1 电源自动控制

(1)把两电源系统并联接上交流 220V。主要检查二电源系统的工作交替。

(2)Ⅰ电源($X_1X_2X_3$)断电,Ⅱ电源供电。2YJ 线圈通电,2XD 亮。

将 KK 开关手柄放在“Ⅱ工作、Ⅰ备用”位置,线路工作情况和上述类似不再叙述。

2 工作冷却器控制

检查各工作冷却器控制运行工况。

3 辅助冷却器控制

检查辅助冷却器的控制、运转情况。

4 备用冷却器的控制

同 I 中(1)、(2)。

5 故障信号回路

回路接直流 220V 电源。现有四种信号回路。

(1)当 I 或 II 电源产生故障,发出信号, I 电源工作, II 电源备用。

(2)当两电源都消失而使冷却器停止工作,经适当延时,使断路器跳闸,将变压器从电网上切除。

(3)当工作辅助冷却器发生故障,备用冷却器投入时,发出声光信号。

(4)当备用冷却器投入运行后,产生故障发出事故信号。

以上是作原理性介绍,各节操作、指示信号从略。

第九节 风扇电动机和油泵电动机汲取功率测量

风扇电动机和油泵电动机是冷却器的重要部件,它们的性能直接影响到冷却器的质量。因此在特殊试验中,有必要对其汲取功率进行测量,以验证其可靠性。

1 风扇

专供变压器冷却系统用的通风机,它采用轴流式叶轮和户外三相异步电动机直轴联结的结构,其结构见图 26-7。

风扇电动机汲取功率测量,根据不同要求可按如下办法进行:

1.1 不装叶轮时的空载试验

施加 50Hz 的额定电压,测出 P_0 、 I_0 。

1.2 堵转子测损耗

施加额定电流,测量 P_k' ,并换算至参考温度时 P_k' 。得总损耗 $P' = P_0 + P_k'$,即为电动机汲取功率。

1.3 安装叶轮后测损耗及电流

按技术条件配置标准直径叶轮。施加额定电压,测出 I'' 及 P' 。与 b 条相比较。如果 $I'' < I_N$, $P' < P'$, 而且不超过设计标准,则认为合格。

1.4 将风扇安装在冷却器上

由于风扇运转的功率由风扇的风量和风压决定,而风压又受风流向阻力的影响,因此测出的 I 及 P 必定大于 c 条的 P' 、 I'' 。若负载 I 及总损耗 P 未超出标准则可保证安全运行。

1.5 型式试验

需测取空载特性曲线,堵转特性曲线及运行特性曲线。

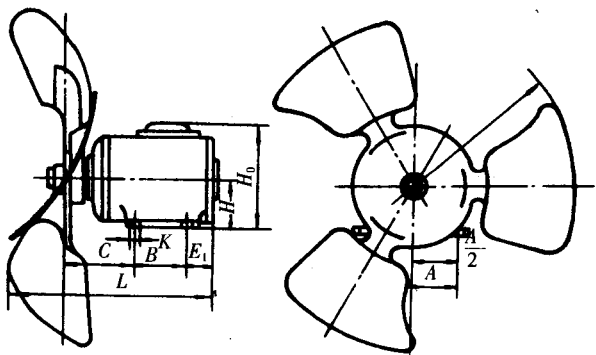


图 26-7 BF-5-8 型风扇

2 油泵

变压器油泵是采用单极泵与三相油浸自冷异步电动机直轴联结的全封闭户外结构, 是一种特制的油内电动机型离心泵。其结构见图 26-8。

油泵电动机汲取功率测量, 根据不同要求可按如下办法进行:

(1) 单个油泵的空载试验, 施加 50Hz 的额定电压 U_N , 测出 P_0, I_0 。

(2) 堵转子测损耗。施加额定电流, 测量 P_k' , 并换算至参考温度时 P_k' 。得总损耗 $P' = P_0 + P_k'$, 即为电机汲取功率。

(3) 若安装在冷却器上时, 测空载损耗及空载电流, 此时, 先把进口油阀门封闭, 打开出口阀门, 开油泵转动直到没有油流通过为止, 读取 P_0, I_0 。

(4) 测量运行损耗及电流。把进口油阀门打开, 开动油泵, 调节进口油压、出口油压, 求出泵的壓力头(扬程), 按技术要求应保持额定油流量和额定扬程, 因此必须通过出入油阀门来调节。但两者很难兼顾。因为油流量与扬程成反比。可以一流量为准。测出 P 及 I 。

与 b 条相比较, 负载电流 I 及总损耗 P 不超出标准就可以了。

(5) 如果做型式试验, 要测取空载特性曲线、堵转特性曲线及做油泵性能试验(绘制流量与扬程、输入功率、输入电流等性能曲线)。

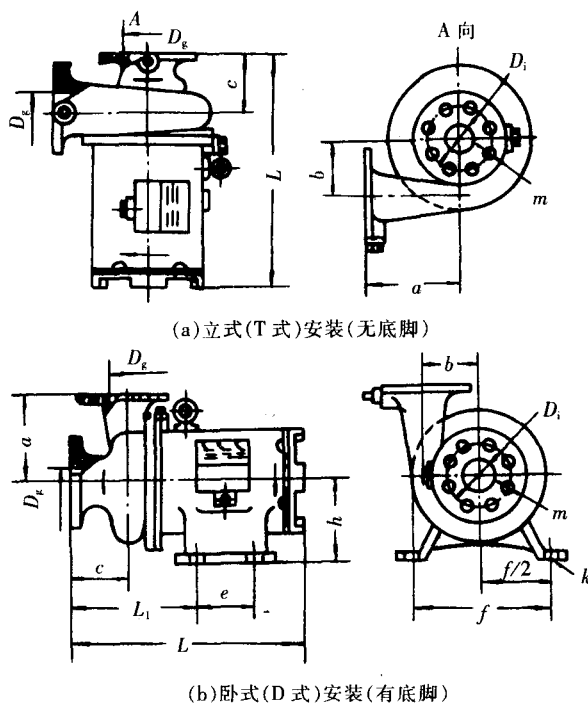


图 26-8 风冷却器上采用的油泵

第二十七章 变压器组件试验

第一节 概 述

变压器组件是变压器的重要部件,当变压器正常运行时,如果组件发生故障,就要对其进行处理;如果组件发生损坏,就可能导致变压器发生事故,可能使变压器退出运行,或虽可带电运行,但应限期予以检查,或暂时失去一部分功能,如果再不及时采取措施,将导致变压器的重大事故。因此制造厂和使用部门严格控制组件质量是一项非常重要的工作,千万不可掉以轻心。

变压器主要组件包括:

- (1)无励磁与有载分接开关;
- (2)冷却器及其油泵、风扇和流量指示器;
- (3)高、低压套管;
- (4)气体继电器;
- (5)压力释放阀;
- (6)速动油压继电器。

前两种组件的试验本书已有专门章节论述,本章主要论述后 4 种组件的检查及试验。

第二节 套管试验

变压器套管制造厂及使用套管的变压器厂都设有高压试验室,在高压试验室中可进行套管型式及例行试验以及入厂检查试验。

套管要符合标准 GB/T4109—1999《高压套管技术条件》(以下简称标准),它等效采用 IEC60137:1995《交流高压高于 1 000V 的套管》4 版标准。

1 套管主要有以下几种

- (1)纯瓷套管,一般是低压的;
- (2)充油套管,主要为 35kV 级;
- (3)复合绝缘套管,主绝缘由两种及以上绝缘材料组合;
- (4)气体绝缘套管;
- (5)浇注树脂套管,有电容式与非电容式;
- (6)胶粘纸、胶浸纸、油浸纸套管,为电容式;前 2 种电压为 60kV~220kV,后一种电压为 60kV~500kV,甚至更高;
- (7)气体或油气套管,主要是 SF₆ 与 GIS 相连接,电压在 110kV~500kV 范围内,多数为 330kV~500kV 级。

以上所列套管前四种为非电容式。

2 套管的额定值

电压符合系统额定电压,电流从 100A 起按 10 的优先系数到 40 000A 均为标准值。

3 技术要求

3.1 暂时过电压

额定电压 $\leq 170\text{kV}$ 的套管,应能在额定电压下运行;额定电压 $>170\text{kV}$ 套管,应能在0.8额定电压下(过电压时间24h内累计不得超过8h,全年累计不得超过125h)运行,对过电压可能超过上述值的系统,可选取较高额定电压的套管。

3.2 海拔

在空气环境中使用的套管,适用于海拔1000m,当海拔在1000m~4000m之间,每超过100m,其闪络距离要增加1%。

3.3 污秽等级与爬距

见表27-1最小爬距的负偏差应符合GB772规定,不得超过 $0.025L+6\text{mm}$,其中 L 为最小公称爬电距离(mm)。

3.4 套管的试验电压

应按GB/T4109—1999中表2.1电压系列I的规定(表27-2)。

表 27-1 套管污秽等级及爬距

污秽等级	爬电比距/ $\text{mm}\cdot\text{kV}^{-1}$
I	16
II	20
III	25
IV	31

表 27-2 电压系列 I 套管的试验电压

额定电压 U/kV	系统标称电压 U_n/kV	60s工频耐受电压(有效值)		雷电冲击干耐受电压(峰值) 全波/ kV	操作冲击耐受电压(峰值) (干或湿)/ kV
		干	湿		
7.2	6	26	23	60	—
12	10	42	30	75	—
(24)	(20)	58	50	125	—
40.5	35	95	80	200	—
72.5	66	147	140	325	—
126	110	185/230		550	—
252	220	395/460		950	—
363	330	535/570		1 175	950
550	500	680/740		1 550/1 675	1 175
电力变压器中性点绝缘套管试验电压					
126	110	105	95	250	—
363	330	255	230	550	—

变压器套管的工频耐电压值比变压器的试验电压高10%,但不低于标准表2.1中数值且持续时间为60s,与频率无关。雷电截波试验电压仅在 $u_r \geq 72.5\text{kV}$ 时才有需要,其值为全波115%,预放电时间在 $2\mu\text{s} \sim 6\mu\text{s}$ 。

3.5 套管的介质损耗因数 $\tan\delta$ 和电容量 C

套管的介质损耗因数和电容量是标志套管品质的重要参数,其最大值不大于标准表3(表27-3)的规定,且 $\tan\delta$ 随着电压变化的 $\Delta\tan\delta$,在 $1.05U_r/\sqrt{3}$ 升到 U_r 时 $\Delta\tan\delta < a$: a. 油浸纸、胶浸纸为0.001;b. 胶粘纸、气体、浇铸树脂为0.004。

3.6 局放

应符合标准表4(表27-4)的规定,

表 27-3 套管的 $\tan\delta$ 最大值

套管主绝缘类型		$\tan\delta$ 最大值
电容式	油浸纸	0.007(550kV及以上套管为0.005)
	胶浸纸	0.007
	胶粘纸	0.010(72.5kV及以下套管为0.015)
	浇铸树脂	0.015
	气体	0.015
非电容式	浇铸树脂	0.020
	复合绝缘	由供需双方商定
其他套管		由供需双方商定

应该指出：套管局放量过大往往导致变压器局部不合格，所以品质不好的套管，决不能用在高压电力变压器上，反过来变压器局放超标，则要检查套管。

3.7 套管的热稳定性能试验

对 $U_r \geq 170\text{kV}$ 胶浸纸或 $U_r \geq 363\text{kV}$ 油浸纸套管要求进行热稳定试验，试验时室温要不低于 10°C ，套管下部浸在 $(90 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的变压器热油中，对 $U_r = 170\text{kV}$ 或 $>170\text{kV}$ 套管分别施加 170kV 或 $0.8U_n$ ，直到 $\tan\delta$ 稳定，才为合格。

应该指出，这是一项质保试验，按 IEC TC14 的意大利专家意见： $\tan\delta < 0.004$ 的套管，此项试验均能通过，即无需做，只有在 >0.004 的套管，这项试验才有用。

3.8 套管各部位热稳定的温升

导体的最高温度由标准中式(2)和式(3)推导出，可与试验值比较，若环境温度不低于 40°C ，但不高于 60°C ，则套管的工频电流应该按下式降低：

$$I_t = I_r \sqrt{\frac{90-t}{90-40}}, \text{A}$$

(27-1)

式中 I_t ——环境为 $t(^\circ\text{C})$ 时套管的允许电流，A

I_r ——套管的额定电流($t=40^\circ\text{C}$)，A

t ——使用环境最高温度， $^\circ\text{C}$

当环境温度低于 40°C ，每降低 1°C 可增加电流 0.5% ，但不应大于 $20\%I_r$ 。

温升试验后可与标准中表 5 比较，以便作出合格结论。

3.9 密封性能

施加比运行压力高 0.1MPa 的压力，维持 1h 不应有任何油气渗漏现象。

3.10 机械弯曲负荷

按标准中表 6，进行试验 60s ，允许运行弯曲负荷可按标准中表 7。

3.11 耐受短时电流 I_{th}

I_{th} 现定为 I_r 的 25 倍， 2s 。

4 试验方法

总的应按 GB/T 775.1、GB/T 775.2 和 GB/T 775.3 绝缘子试验方法。

具体试验方式可结合各变压器厂的实际情况确定：

- 目测及量尺寸(低压套管)；
- 抽查，1 只到数只；
- 小批检查，数只高压套管；
- 逐个检查， 330kV 及以上套管。

4.1 油试验

按标准中表 8，油性能推荐值见标准中附录 B。

表 27-4 套管的局部放电最大值

套管的绝缘型式	测量电压/kV		
	U_r ①	$1.5U_r/\sqrt{3}$ ②	$1.05U_r/\sqrt{3}$
油浸纸式	10	10	5
胶浸纸式	10	10	5
胶粘纸式③	—	250	100
带有金属层的	④	④	300
气体浸渍	10	10	5
气体		10	5
浇铸树脂式	—	10	5
复合式	④		
其他	④		

- ①仅适用于变压器套管。
- ②对开关设备套管，放电量可在供需双方协议的较低电压下测量。
- ③对用于电力变压器上的胶粘纸套管可由供需双方协议有较低的放电量。
- ④复合式及其他型式套管的最大允许放电量应由供需双方商定。

4.2 瓷套检查

按 GB772 确定的检查。

4.3 耐压试验

要有相应的油箱,例如 $\phi 3\text{m} \sim \phi 5\text{m}$,深 $3\text{m} \sim 4\text{m}$ 将下部浸入油中,如尺寸较小,可在瓷套下部均压罩外设计绝缘屏障,以提高其耐压水平。试验工频耐压,干试、湿试、冲击及操作冲击见本书有关章节。

4.4 $\tan\delta$ 测量

一般用西林电桥正接法测量,对高压引线要加粗线径,以免发生电晕或刷状放电,当电晕及放电产生后,套管的各均压屏均接收到这种电荷,传入接电桥的测量极,导致测量的 $\tan\delta$ 增加,得出不正确的结果。

4.5 局部放电测量

试验要在良好屏蔽的高压试验室内进行,其引线应用良好圆管,接头要有均压罩。

背景噪声 $\leq 1/2$ 测量值。

测量时电压先升到 $2U_r/\sqrt{3}$,维持 5s,然后降至 $1.5U_r/\sqrt{3}$ 和 $1.05U_r/\sqrt{3}$ 维持 5min 分别进行测量,然后与标准规定值比较。

4.6 热稳定试验

按环境及油温规定,当达到平衡后施加 $U_m/\sqrt{3}$ 电压,当连续 5h 而 $\tan\delta$ 无变化,则认为已达到热稳定。

4.7 温升试验

在 10°C 环境温度下,套管下部浸入 $(90 \pm 2)^\circ\text{C}$ 热油中,通 $I_r \pm 1/2\%$ 电流,一直到温升稳定(2h 温升变化 $< 2\text{K}$),再与标准值比较,确定合格与否。套管各部位允许的最高温度值和温升见表 27-5。

表 27-5 套管各部位允许的最高温度值和温升

部件说明				最大温升/K	最高温度/℃	备注 ^①	
弹性接触	铜与铜合金	无镀层	空气中	45	75	④	
			SF ₆ 中	60	90		
			油中	50	80		
		镀锡	空气, SF ₆ 或油中	60	90	②	
			电镀银或镍	空气或 SF ₆ 中	75		105
				油中	60		90
螺旋接触	铜 铝 铜合金 铝合金	无镀层	空气中	60	90	②	
			SF ₆ 中	75	105		
			油中	70	100		
		镀锡	空气或 SF ₆ 中	75	105	②	
			油中	70	100		
		电镀银或镍	空气或 SF ₆ 中	85	115	②	
			油中	70	100		
		用螺钉或螺栓连接的外用接线端子	铜、银及其合金	无镀层		60	90
镀锡					75	105	
电镀银或镍					70	105	
与绝缘接触的金属件	绝缘等级			A 级(油浸纸)	75	105	
		E 级(胶粘纸和胶浸纸)	90	120			

①温升的数值根据最大日平均温度 30°C 为基础;②对于合成绝缘体(硅树脂、酯类)由供需双方商定较高的数值;③如何估计有严重氧化,温升应限制在 50K ;④弹性接触是用弹簧压力维持连接,如插入式连接。

4.8 短时热电流耐受试验

按标准中 6.12 条及图 1 规定,要先加一定的电流使套管预热,然后加 $25I_r$ 电流 2s,用热电偶测量套管的发热温度,并检查套管有否明显损坏。但对变压器套管未规定下部放在 $(90\pm 2)^\circ\text{C}$ 热油中,这一问题不大,因电力变压器作短路试验时阻抗比较大。例如 10%,只产生 10 倍电流,所以 25 倍电流比装在变压器上为严格。

4.9 密封试验

油浸套管加压 $(0.1\pm 0.01)\text{MPa}$, 1h 仔细检查各密封面。

充气套管应置于一外壳中(如塑料壳),在 2h 或大于 2h 后测量外壳内含该气体浓度,折算每年泄漏量 $<1\%$ 为通过。

4.10 机械弯曲试验

如果变压器厂不具备试验条件,可由电瓷厂参见标准 6.14 款,进行试验。各变压器厂,可按自己使用套管的电压等级,数量的多寡,确定自己的检查内容与方法,总原则是把好套管的质量关,不使套管选择与入厂把关不严,而酿成变压器事故,这类事例过去并非少见,值得工厂材料与试验部门的高度重视。套管的弯曲耐受负荷试验见表 27-6,允许运行弯曲负荷见表 27-7。

表 27-6 套管的弯曲耐受负荷试验

N

额定电压 /kV	额定电流 I_r/A							
	≤ 800		1 000~1 600		2 000~2 500		$\geq 3 150$	
	I	II	I	II	I	II	I	II
≤ 40.5	1 000	1 000	1 000	1 250	2 000	2 000	3 150	3 150
52	1 000	1 600	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	3 150
72.5	1 000	2 000	1 250	2 000	2 000	3 150	4 000	4 000
123~145	1 250	3 150	1 600	3 150	2 500	4 000	4 000	4 000
170~252	1 250	4 000	1 600	4 000	2 500	5 000	4 000	5 000
≥ 362	2 500	4 000	2 500	4 000	3 150	5 000	5 000	5 000

表 27-7 套管允许运行弯曲负荷

N

额定电压 /kV	额定电流 I/A							
	≤800		1 000~1 600		2 000~2 500		≥3 150	
	套管安装与垂直线夹角≤30°							
	I	II	I	II	I	II	I	II
≤40.5	500	500	625	625	1 000	1 000	1 575	1 575
52	500	860	625	800	1 000	1 250	1 575	1 575
72.5	500	1 000	625	1 000	1 000	1 575	2 000	2 000
123~145	625	1 575	800	1 575	1 250	2 500	2 000	2 500
170~252	625	2 000	800	2 000	1 250	2 500	2 000	2 500
≥362	1 250	2 000	1 250	2 000	1 575	2 500	2 500	2 500
额定电压 /kV	套管安装与垂直线夹角>30°							
	I	II	I	II	I	II	I	II
≤40.5	300	300	375	375	600	600	945	945
52	300	480	375	480	600	945	945	945
72.5	300	600	375	600	600	945	1 200	1 200
123~145	375	945	480	1 200	750	1 500	1 200	1 500
170~252	375	1 200	480	1 200	750	1 500	1 200	1 500
≥362	750	1 200	750	1 200	945	1 500	1 500	1 500

第三节 气体继电器试验

气体继电器主要用于变压器在过热、短路时发生的瓦斯进行保护,防止事故扩大,一般轻瓦斯作用于发信号,重瓦斯作用于跳闸。800kVA 及以上的变压器均按 GB6451—1999 要求装有气体继电器。

所有油浸式变压器及油浸式有载分接开关均用气体继电器加以保护,气体继电器试验依据 JB/T9647—1999 行业标准。

1 继电器的主要规格

(1)管路通径:25、50、80mm,有统一的安装尺寸。具体数据见标准中表 1,如 QJ2-80 管路通径为 80mm 的第二次改型设计的气体继电器。

(2)工作电压:110/220V 交流, $\cos\varphi \leq 0.6$ 或直流,直流时间常数 $S \leq 5 \times 10^{-3}s$,工作电流 0.3A。

(3)还应具有:

①气塞:供取气样、放气以及试验信号接点用;

②视察窗:供视察油面及积聚气体量;

③探针:供检查跳闸接点用;

④接线盒:供继电器出线用;

⑤油速标尺:供简易整定油速用。

2 试验项目及方法

(1)密封试验:加 200kPa 压力试验,无渗漏。

(2)动作特性试验

按表 27-8 给定每种规格的最大和最小油速各测三次。每次试验,跳闸接点均应可靠动作,指示装置稳定地发出信号。

取三次平均值作为整定值,当标尺的油速值与整定值之差不大于 $\pm 0.1m/s$,且每次试验值与整定值之差不大于 $\pm 0.05m/s$ 时,则认为合格。

(3)耐压试验:2 000V,1min,无辉光、闪络。

(4)接点容量及寿命试验:直流时间常数 $\leq 5 \times 10^{-3}s$,开闭 1 000 次;交流 $\cos\varphi \leq 0.6$ 闭合 1 000 次,其表面无烧伤。

(5)气体容积刻度偏差试验:气体容积刻度值与实测油的体积之差不大于实测油体积的 $\pm 10\%$ 为合格。

(6)反向油流试验:反向冲击三次,无变形及损伤。

(7)抗震能力试验:在振动台上,用正弦波 4Hz~20Hz,加速度为 $4g/s^2$,在 X、Y、Z 轴三个方向各试 1min,指示装置不发出信号,这项试验为防止 $0.2g/s^2 \sim 0.4g/s^2$ 加速度地震时发生误动作,这项试验仅在新产品进行。

(8)防喷水试验:按 GB4208—1993 第 7.5 条进行,然后复试耐压试验。

3 试验用仪器设备(见表 27-9)

4 入厂检查试验

主机厂若不具备试验用仪器设备,可派员到生产厂监试或抽样委托专门的试验室试验。

表 27-8 油速整定范围

管路通径/mm	油速整定范围/ $m \cdot s^{-1}$
25	1.0
50	0.6~1.2
80	0.7~1.5

第四节 压力释放阀试验

压力释放阀,是在变压器发生短路油箱压力增长时,为防止油箱破裂,而采取的降压措施。对大变压器保护特别重要,800kVA 及以上的变压器按 GB6451—1999 要求均应安装压力释放阀,其产品标准为 JB/T7065—2004,试验应符合导则 JB/T7069—2004。

1 压力释放阀规格和性能参数见表 27-10、表 27-11

2 技术要求及试验方法

2.1 开启压力试验

常温下充压缩空气,当压力增量为 25kPa/s~40kPa/s 时,压力释放阀应间歇跳动,周期 1s~4s,信号开关应可靠切换和自锁,连续动作 10 次无异常为合格。

2.2 关闭压力试验

常温下充气加压,压力释放阀动作后,立即关闭进气阀,当压力表指针完全停止时的压力即为关闭压力。做三次,取最小值。

2.3 时效开启性能试验

将静放 24h 以上的压力释放阀,进行开启性能试验,第 1 次开启试验值要符合标准中表 3 规定。

2.4 高温、低温开启性能试验

在高温 100℃和低温-30℃下,将压力释放阀放入高低温箱中,当温度达到 100℃、-30℃时,保持 30min 后取出,进行开启性能试验。

2.5 密封试验

(1)向释放阀施加标准中表 3 规定的密封压力值,历时 2h 不渗漏。

(2)对释放阀抽真空,其渗漏率 $\leq 1.33\text{Pa}\cdot\text{L/s}$,且构件无变形和损坏。

2.6 排量性能试验

将释放阀安装在专用的试验装置上,在常温及 100℃条件下,分别测量流体在不同增压速度下,释放阀开启的实际排量,作出排量与增压速度的函数曲线,验证技术条件规定的最大、最小排放量。

2.7 开启时间试验

用可燃气体做三次,二次动作时间 $\leq 2\text{ms}$ 为合格。试验波形图见图 27-1。

2.8 500 次动作可靠性试验

将释放阀安装在试罐上,使其动作 500 次,然后复试开启压力、关闭压力和密封性能试验。

2.9 防护性能试验

表 27-9 试验仪器设备

试验项目	仪器、设备
动作特性试验	流速试验台
绝缘耐压试验	试验变压器
	调压器
密封试验	密封罐
接点容量试验	阻抗装置
气体容积刻度偏差试验	量杯
油流速标尺刻度偏差试验	流速试验台
反向油流试验	流速试验台
抗震能力试验	振动台
防喷水试验	水槽、喷头

表 27-10 压力释放阀规格

喷油有效口径/mm	开启压力/kPa
$\phi 25$	15, 25, 35, 55
$\phi 50$	
$\phi 80$	35, 55, 70, 85
$\phi 130$	

表 27-11 压力释放阀性能参数

开启压力	开启压力偏差	关闭压力(不小于)	密封压力(不小于)
15	± 5	8	9
25		13.5	15
35		19	21
55		29.5	33
70		37.5	42
85		45.5	51

按 GB4208—1984 标准的规定进行。

2.10 防潮、防盐雾试验

应分别按 GB2423.4—1981 与 GB2423.17—1981 方法的规定进行。

试验仪器和设备见表 27-12。

表 27-12 压力释放阀试验用仪器、设备

试验项目	仪器、设备
开启压力试验	开启罐
关闭压力试验	关闭罐
开启时间试验	试验罐
	数字示波器
	压力传感器
信号开关绝缘性能试验	试验变压器
	调压器
时效开启性能试验	开启罐
密封性能试验	密封罐
高低温开启性能试验	高低温箱
密封圈耐油耐老化试验	恒温干燥箱
真空密封性能试验	真空泵
	电阻真空计
500 次动作可靠性试验	开启罐
排量试验	排量试验台
	数字示波器
	压力传感器
防护性能试验	水槽

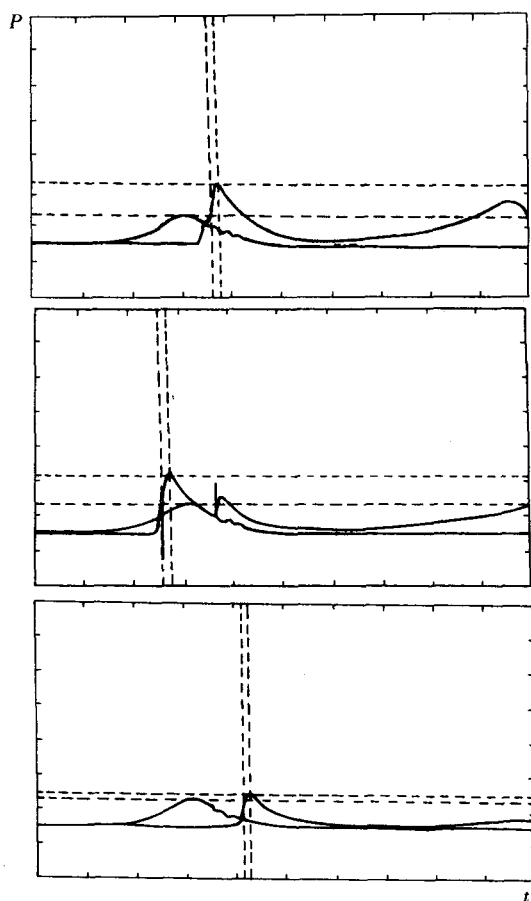


图 27-1 释放阀动态动作试验波形图

第五节 速动油压继电器试验

速动油压继电器是指变压器或电抗器在发生故障时,变压器箱内油压升高速度非常快,达到 $2\text{kPa/s} \sim 500\text{kPa/s}$ 时发出信号,相应的动作时间为 $17.2\text{s} \sim 0.044\text{s}$,使其成为压力释放阀的后备保护装置。它安装于 800kVA 及以上电力变压器或电抗器上。它与变压器连通的口径为 25mm 、 50mm ,装于油箱侧面。

试验依据 JB/T10430—2004 标准。

1 动作特性试验

继电器的动作特性符合标准中表 1 规定。

2 密封试验

(1) 例行试验:继电器整体需经 100kPa 正压力的油压试验,历时 60min 无渗漏现象。

(2) 型式试验:继电器充满煤油,在常温下加压到 100kPa ,历时 24h 无渗漏现象。

3 绝缘试验

接线端子间及对地施加工频电压 $2\,000\text{V}$,持续 1min ,无击穿闪络。

4 接点容量及寿命试验

继电器的接点在标准表 2 规定的条件下,将接点的端子接于回路中,接点应可靠开、闭 $1\,000$

次,接点表面应无烧蚀现象。

5 抗振动能力试验

继电器安装于加振台上,在振动频率为 4Hz~20Hz,加速度为 $2g/s^2 \sim 4g/s^2$ 时,在 X、Y、Z 轴三个方向各试 1min,指示装置不应发出信号(接点不应接通)。

如果变压器厂不具备试验条件,只能到组件厂抽查或委托试验。

第二十八章 测量系统和仪器的校准

第一节 概 述

变压器试验中使用的测量系统和仪器的准确度直接影响变压器试验的质量和变压器试验数据的准确性,ISO9000 系列标准和 ISO/IEC17025:1999《检测和校准试验室能力的通用要求》都对测量设备的校准和溯源作了明确的详尽的规定,要求测量设备能溯源到国家标准或国家基准。

变压器试验所用的测量系统和设备与一般测量设备相比,有它的特殊性。最主要的特点是变压器试验所用的测量系统和设备很多都在高电压条件下运行,需要用高电压设备,施加交流或冲击高电压,工作量较大。另外,同等于额定电压的标准测量系统不易移动和运输,因此,校准和比对试验很难进行。

经过各国高电压试验专家的研究、讨论并通过的 IEC 60-2:1994《高电压试验技术 第二部分 测量系统》(国家标准 GB/T16927.2—1997 等同采用该标准)和前一版本相比,突出强调了高电压试验中使用的测量系统必须进行校准试验,对各种测量系统提出了具体的不确定度要求。为了使测量系统的比对试验得以实施,标准提出:试验应在最大工作电压或电流下(只要有可能)与标准测量系统比对。由于最高电压或电流的标准测量系统难以获得,因而可在低电压或电流,如 20%最高工作电压或电流下进行比对。这就为变压器试验使用的测量系统的校准提供了可以操作的基本方法。

本章所述的测量系统校准方法只是目前看来比较合理、较容易实现的方法,但这不是唯一的方法。对于其他方法,本章不再介绍。

第二节 交流高电压测量系统的校准

交流高电压测量系统的校准应按照国家标准 GB/T16927.2—1997《高电压试验技术 第二部分 测量系统》进行。

交流高电压测量系统由高压分压器、传输电缆和指示仪表组成。本节所述的校准是指整套系统的校准,系统的校准是在各部件校准的基础上进行的。

1 对测量系统的要求

国家标准 GB/T 16927.2—1997 规定了交流测量系统的一般要求为:

在额定频率下测量试验电压峰值或有效值的总不确定度应在 $\pm 3\%$ 范围内。

(1)刻度因数的线性度:在交流测量系统的电压范围内最大和最小值之间,刻度因数的变化不得超过 $\pm 1\%$ 。

(2)刻度因数的稳定度:在一定的环境温度范围内刻度因数的变化范围不应超过 $\pm 1\%$ 。

(3)动态特性 测量系统的幅—频响应在 0.2 倍~7 倍的试验电压频率范围内的变化不超过 $\pm 2\%$ 。

2 校准方法

2.1 校准试验接线

按图 28-1 接线。

2.2 标准测量系统和被校测量系统

(1)标准测量系统:由标准互感器、AC 峰值电压表及传输电缆等组成。标准互感器和 AC 峰值

电压表必须根据国家标准或检定规程进行校准并在有效期内。标准互感器技术参数为：额定电压至少要大于被校交流测量系统额定电压的 20%，变压比与 AC 峰值电压相配，0.01 级；AC 峰值电压表技术参数为：量程与标准互感器变压比相配，可测分压器高压端电压，0.5 级。

(2) 被校交流测量系统：由电容分压器、AC 峰值电压表及传输电缆等组成。AC 峰值电压表由经国家质量技术监督部门授权的计量技术机构校准合格，并在有效期内。

2.3 测量系统的放置

比对试验时，被校分压器的安放位置应和正常工作时相同，标准互感器和被校分压器连线尽可能短，并应在同一点接地。

2.4 校准峰值电压的选择

根据国标 GB/T16927.2—1997 的规定，确定标定刻度因数的标准方法是在最大工作电压或电流下与标准测量系统比对，由于最高电压或电流的标准测量系统难以获得，因而可在低的电压或电流，如 20% 最高工作电压或电流下进行比对。校准峰值电压的选择应以此为原则。

3 校准程序

(1) 试验变压器升压至标准互感器或电容分压器的额定电压（取低者），标准测量系统 AC 峰值电压表的读数为 U_s （ U_s 为 V 乘以标准测量系统的刻度因数的读数），作为被校测量系统的高压端输入电压；被校测量系统 AC 峰值电压表的读数为 U_x ，作为被校测量系统的测得值。计算被试测量系统的标定刻度因数 F_i 值：

$$F_i = \frac{U_s}{U_x} \quad (28-1)$$

(2) 试验重复 n 次（ $n \geq 10$ ），记录两套测量系统的测量值，计算 n 个 F_i 值。对于比对测量的 n 次试验，既可施加一次试验电压，读取 n 次读数，也可施加 n 次试验电压读取每次读数。

(3) 按照国标 GB/T16927.2—1997。计算被试测量系统的刻度因数 F_{mk} 和标准偏差。刻度因数的平均值为：

$$F_{mk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (28-2)$$

刻度因数的标准偏差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_{mk})^2}{n-1}} \quad (28-3)$$

刻度因数的标准偏差应满足：

$$S = \frac{s}{F_{mk}} \leq 1\%$$

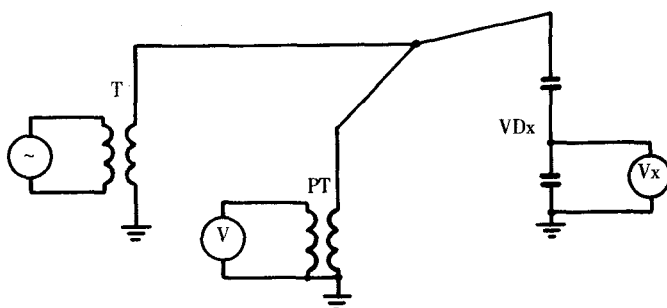


图 28-1 交流高压测量系统比对校准接线图

T—高压试验变压器 PT—标准互感器 V—标准系统的电压表 VDx—被校分压器 Vx—被校系统的电压表

这时,计算得到的 F_{mk} 是最高试验电压时被试测量系统的平均刻度因数。

(4)线性度试验

①在额定电压下测得刻度因数后,在测量系统额定电压范围选一最小试验电压,施加此电压,按(1)~(3)程序测量被试测量系统的刻度因数 F_{mk} 。

②在测量系统额定电压范围的最大值和最小值之间取三个大致等分的试验电压值,按(1)~(3)程序测量被试测量系统的刻度因数 F_{mk} 。这样,就得到了被试测量系统 n 个试验电压点的刻度因数, $n=5$ 。

③计算刻度因数的平均值 F_m :

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{mk} \quad (28-4)$$

④计算不同试验电压下刻度因数与平均刻度因数 F_m 的偏差:

$$\Delta F = F_{mk} - F_m \quad (28-5)$$

ΔF 小于 $\pm 1\%$, 则满足国标 GB/T16927.2—1997 的要求。

(5)被试测量系统动态特性的测量:

测量系统的幅—频响应在 0.2 倍~7 倍的试验电压频率范围内的变化不超过 $\pm 2\%$ 。工频 AC 测量系统工作在 50Hz 频率下,其幅—频响应在 10Hz~350Hz 的频率范围内变化不超过 $\pm 2\%$ 。

①考虑到 AC 测量系统的分压比很大,约 8 000~10 000,校准用的信号发生器输出信号幅度选择大于 100V,这样低压侧输出电压可达到 100mV,便于测量;频率范围可选择超过 10Hz~350Hz。如日本横河公司制造的 2 558AC 电压/电流标准可在 40Hz~400Hz 范围内试验 AC 测量系统的动态特性。

②断开测量系统的高压端与试验变压器的连接线,高压端引线接到信号发生器的输出端,高压端引线必须拉直。低压侧引线接入 0.1 级的电压表(频率范围 40Hz~400Hz)。

③信号发生器输出频率置 50Hz,输出电压幅度置最高(如 100V)。假设分压器的分压比为 10 000,则电压表示值应为 $100/10\,000=10\text{mV}$ 。

④调整信号发生器输出信号的频率为 40、100、150、200、250、300、350 和 400Hz,记录电压表示值。

⑤计算在整个频率范围内电压表示值的变化,需要时画出幅—频响应曲线。

测量系统的动态特性试验是型式试验项目,如果测量系统制造商未提供该项试验的报告或未进行该项试验,则应在验收试验时进行该项试验。

第三节 冲击试验用数字记录仪的性能要求和校准

由于数字记录仪在自动化测量和强大的数据处理能力方面具有模拟型仪器无可比拟的优点,数字记录仪理所当然地在变压器冲击试验测量中得到了广泛的应用。

冲击试验测量用数字记录仪有强大的数据处理能力,一般都配置波形参数计算、波形比较、传递函数和相关函数等数据处理软件。在变压器冲击试验中,它不但实现了冲击波形参数的自动化测量,而且提供了丰富的变压器故障诊断的手段,成为变压器冲击试验不可缺少的测量仪器。由于它有强大的数字处理分析功能,往往被称为数字冲击分析系统。

为了保证测量准确度,冲击试验测量用数字记录仪必须进行定期校准。

1 数字记录仪校准依据的标准

(1)GB/T 16927.2—1997《高电压试验技术 第二部分 测量系统》

(2)GB/T 16896.1—1997《高电压冲击试验用数字记录仪 第一部分 对数字记录仪的要求》

(3)IEC 1083-1:1991《Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests Part1 : Requirements for digital recorders》(高电压冲击试验测量用数字记录仪 第一部分 对数字记录仪的要求)

2 数字记录仪的主要技术指标

数字记录仪是应用很广的仪器。其在变压器冲击试验中用于测量冲击电压时,应根据高电压冲击试验的不同类型,满足所需的性能要求。

2.1 总不确定度限值

GB/T 16896.1—1997 和 IEC 1083-1:1991 标准中规定,冲击数字记录仪的测量不确定度应不大于:

(1)冲击电压峰值测量:±2%;

(2)冲击时间参数(波前时间、截断时间等)测量:±4%。

2.2 性能要求

2.2.1 采样率

单位时间内的采样数,单位为:MS/s

采样率应大于等于 $30/T_x$ (采样点/秒), T_x 为被测时间间隔。如在测雷电冲击全波波前时间 T_1 时, T_x 为 T_{30} 和 T_{90} 之间的时间间隔。 T_{30} 和 T_{90} 分别为达到冲击电压峰值的 30% 和 90% 处的时间。

例如测量 $1.2\mu\text{s}/50\mu\text{s}$ 雷电全波时,考虑到波前时间允许-30%的负公差,即要测量的波前时间最小为 $0.84\mu\text{s}$, 其 T_{30} 和 T_{90} 之间的时间间隔为 $0.5\mu\text{s}$, 则采样率应大于等于: $30/0.5 \times 10^{-6} = 60 \times 10^6 = 60\text{MS/s}$ 。

2.2.2 额定分辨率

能测出的额定最小输入增量所占满量程的分额,当额定位数为 N 时,它可表示为 2 的 N 次方的倒数的百分数,即:

$$r = \frac{1}{2^N} \times 100\%。$$

测量冲击波形参数时,额定分辨率应小于等于满量程偏转的 $0.4\%(2^{-8})$;需要对记录进行对比的试验中,额定分辨率推荐小于等于满量程偏转的 $0.2\%(2^{-9})$;即应分别选额定分辨率高于等于 8bit 和 9bit 的数字记录仪。

2.2.3 记录长度

一次记录中总共存储的采样数。记录长度亦称为字长、存储长度,它取决于数字记录仪存储器的大小。记录长度的选择有时没有引起足够的重视,其实是一项很重要的指标;它的合理选择影响到能否记录到全部感兴趣的波形和充分利用最高采样率以将采样误差减到最小。

如一台采样率为 100MS/s 、记录长度为 1 000 的数字记录仪用于冲击试验。测量雷电截波时选采样率为 100MS/s ,则可记录的时间为 $1\,000/100 \times 10^6 = 10\mu\text{s}$ 。测量雷电截波没问题。当测量 $1.2/50$ 雷电全波时,需要的记录时间应为 $100\mu\text{s}$,只能将采样率设为 10MS/s ;这时,采样率就不满足波前时间测量采样率 $\geq 30/T_x$ 的要求了,给波前时间的测量带来极大的误差。

2.2.4 幅值非线性

数字记录仪的静态整体非线性应在满量程偏转的 0.5% 以内。静态和动态试验所确定的局部非线性均在 0.8 以内。

2.2.5 时基非线性

时基的整体非线性应小于被测时间间隔 T_x 的 2%。数字记录仪都用石英晶体稳定时基电路的频率,其时基的稳定性相当高。

2.2.6 冲击刻度因数

与校准偏移后的输出相乘可确定表 28-1 所列输入冲击电压测量值的因数。

表 28-1 GB/T 16896.1—1997 规定的对标准冲击校准器的要求

冲击波类型	波形参数	标准值	准确度/%	短期稳定性/%
雷电全波	波前时间 T_1	0.84 μ s	± 2.0	0.5
	半峰值时间 T_2	60 μ s	± 2.0	0.2
	峰值电压 U_p	满量程的 40%~60%	1.0	0.2
0.5 μ s 波前截断的雷电波	截断时间 T_c	0.50 μ s	2.0	1.0
	峰值电压 U_p	满量程的 40%~60%	1.0	0.2
操作波	波前时间 T_1	20 μ s	2.0	0.2
	半峰值时间 T_2	4 000 μ s	2.0	0.2
	峰值电压 U_p	满量程的 40%~60%	1.0	0.2

在 $0.5T_1$ 到 $2T_2$ 的时间间隔内,冲击刻度因数的变化应在 $\pm 1\%$ 以内。 T_1 、 T_2 分别为雷电冲击的波前时间和视在半峰值时间。对于截波, T_2 由截断时间 T_c 代替。操作波与雷电全波用相同方法定义。冲击刻度因数是冲击测量中最重要的一项技术指标。

2.2.7 上升时间

数字记录仪输入阶跃波时,响应曲线上达到稳定电平的 10%和 90%两点间的时间间隔。

冲击数字记录仪的上升时间 T_r 应小于等于 $1/2\pi f_{\max} f_{\max}$ 为试验回路可能出现的最高振荡频率;同时, T_r 还应不大于 $0.08T_x$, T_x 为被测时间间隔。

3 数字记录仪例行性能校准的方法

所有测量设备必须进行周期校准(检定)。冲击试验测量用数字记录仪当然不能例外。对于新的数字记录仪以及在大修后或对其性能有疑问的数字记录仪 GB/T 16896.1—1997 和 IEC 1083-1:1991 标准详细规定了要检定其静态刻度因数、静态整体非线性、静态局部非线性、冲击刻度因数、动态局部非线性、上升时间、时基的局部非线性等特性。这些检定比较复杂和费时,一般由制造厂商进行。制造厂商在数字记录仪销售时已提供了经检定后的上述特性。

冲击数字记录仪的周期校准可按 GB/T 16972.2—1997 规定的例行试验和 GB/T 16896.1—1997(IEC 1083-1:1991)规定的例行性能校准进行。一般推荐冲击校准法。

3.1 校准仪器

标准冲击校准器是专用于冲击数字记录仪等测量设备校准的仪器。

GB/T 16896.1—1997 规定的对标准冲击校准器的要求见表 28-1。

典型的一台标准冲击校准器还可进行阶跃波响应试验和直流校准,它的技术指标见表 28-2。

3.2 冲击校准方法

冲击校准方法用标准冲击校准器输出的准确标准波形输入被校的冲击数字记录仪对冲击数字记录仪的 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 进行校准。

(1)将标准冲击校准器的输出端(OUTPUT)用专用高频电缆与被测冲击数字记录仪的输入端连接。被检冲击数字记录仪只校准测量电压波的通道(一般为 1 通道),有特殊要求的另外加以考虑。

(2)标准冲击校准器和被校准冲击数字记录仪开机预热。被校准冲击数字记录仪根据校准的

表 28-2

输出波形	波形参数	标准值	准确度/%	StaDev/%
雷电全波	波前时间 T_1	$0.84\mu\text{s}$	± 2.0	0.2
	半峰值时间 T_2	$60\mu\text{s}$	± 2.0	0.2
	峰值电压 U_p	$\pm 80 \sim 1\,600\text{V}$	± 0.5	0.1
$0.5\mu\text{s}$ 波前截断的雷电波	截断时间 T_c	$0.50\mu\text{s}$	± 2.0	1.0
	峰值电压 U_p	$\pm 400 \sim 1\,250\text{V}$	± 1.0	0.2
操作波	波前时间 T_1	$20\mu\text{s}$	± 2.0	0.2
	半峰值时间 T_2	$4\,000\mu\text{s}$	± 2.0	0.2
	峰值电压 U_p	$\pm 80 \sim 1\,600\text{V}$	± 0.5	0.1
阶跃波	上升时间 T_r	$< 20\text{ns}$		
	电压 U	$+1\,000 \sim +2\,000\text{V}$	± 1.0	0.2
直流电压		$+200 \sim +2\,000\text{V}$	± 0.2	

波形参数进行设置,直至“待触发”状态。

(3)标准冲击校准器输出的波形可根据实际冲击试验的被测波形按表 28-2 选取。校准脉冲的峰值选在被校设备满度偏转(f.s.d)的 40%~100%,一般可选 80%。

(4)启动标准冲击校准器,输出校准冲击波形。每一峰值电压下,共施加 20 次以上的校准冲击波形。被校冲击数字记录仪每一次校准冲击波形,计算并记录其 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 等波形参数。

(5)对被校冲击数字记录仪的每一量程必须进行正、负极性的校准。可以将输出校准冲击波形的峰值电压依次从负最大值变换至正最大值或相反,按(4)的程序进行校准。

(6)记录的波形及其参数均作为计算误差的依据。

4 数字记录仪校准数据的处理

4.1 标定刻度因数及其标准差的计算

根据 GB/T 16927.2—1997 的定义,标准冲击校准器输出的峰值电压作为输入量,除以被校仪器的读数,就得到被校仪器的标定刻度因数。校准重复 n 次($n > 20$),可得 n 个独立的 F_i ,取平均值 F_m 作为被校仪器的标定刻度因数。

$$F_i = \frac{U_{ps}}{U_{px}}$$

式中 U_{ps} ——标准冲击校准器输出的峰值电压;

U_{px} ——被校仪器读出的峰值电压。

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (28-6)$$

F_m 的实验标准差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (28-7)$$

试验标准差的相对形式为:

$$S = \frac{s}{F_m} \quad (28-8)$$

4.2 测量准确度的计算和刻度因数的修正

U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 的误差用测量值的平均值与标准值的偏差来表示。一般用相对误差形式来表示。同时,要计算 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 的标准差。当 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 的误差较大时,可修正数字记录仪的刻度因数,即数字记录仪的指示值乘以刻度因数 F_m 作为测量值,则测量准确度取决于 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 的标准差,测量系统的测量准确度得到了提高。

5 数字记录仪校准实例

按上述方法对某高压试验室的 Niclet Power Pro 620 数字冲击波形分析系统进行冲击校准。标准冲击校准器用瑞士 HAEFELY 公司制造的 RIC-422, 其输出波形参数和准确度完全符合表 28-2 的要求。每一峰值电压施加 20 次雷电冲击波,计算后得到 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 测量的误差、刻度因数 F_m 及 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 的标准差等数据。表 28-3 和表 28-4 是 Niclet Power Pro 620 数字冲击波形分析系统校准证书中的测量结果。从数据看,该数字冲击波形分析系统雷电全波和 0.5s 波前截断雷电波测量满足 GB/T 16896.1—1997 标准的要求。

表 28-3 Niclet Power Pro 620 CH1 雷电截波(0.5 波前截断)校准结果

序号	620 量程/V	测试电压/V	U_p 误差/%	T_c 误差/%	刻度因数 F_m	U_p 的标准偏差	T_1 的标准偏差
1	2 000.00	1 250.00	1.552 0	1.119 0	0.984 7	0.249 6	0.912 9
2	800.00	650.00	0.738 5	0.342 0	0.992 7	0.293 5	0.907 4
3	400.00	400.00	1.062 5	0.283 0	0.989 5	0.244 3	0.710 7
4	-400.00	-400.00	1.296 3	0.140 0	0.987 2	0.330 0	0.854 2
5	-800.00	-650.00	1.443 1	0.443 0	0.985 8	0.325 6	0.876 8
6	-2 000.00	-1 250.00	1.664 0	0.732 0	0.983 6	0.236 2	0.828 8

表 28-4 Niclet Power Pro 620 CH1 雷电波(0.84/60)校准结果

序号	620 量程 /V	测试电压 /V	U_p 误差 /%	T_1 误差 /%	T_2 误差 /%	刻度因数 F_m	U_p 的标准偏差	T_1 的标准偏差	T_2 的标准偏差
1	2 000.00	1 600.00	0.378 0	0.136 0	-0.462 0	0.996 2	0.013 9	0.243 6	0.048 2
2	800.00	650.00	0.400 0	-0.180 0	-0.690 0	0.996 0	0.044 7	0.131 1	0.075 1
3	400.00	320.00	0.489 0	0.075 0	-0.788 0	0.995 1	0.070 8	0.221 0	0.163 2
4	200.00	160.00	-0.272 0	0.939 0	0.271 0	1.002 7	0.030 7	0.110 5	0.043 8
5	80.00	80.00	-0.739 0	0.935 0	-0.125 0	1.007 4	0.184 9	0.172 1	0.230 5
6	-80.00	-80.00	-0.056 0	1.792 0	0.758 0	1.000 7	0.029 4	0.215 6	0.117 9
7	-200.00	-160.00	-0.094 0	0.940 0	0.683 0	1.000 9	0.031 9	0.154 9	0.045 7
8	-400.00	-320.00	0.578 0	1.000 0	-0.375 0	0.994 8	0.078 9	0.308 9	0.139 7
9	-800.00	-650.00	0.500 0	0.899 0	-0.325 0	0.995 0	0.033 1	0.147 7	0.091 4
10	-2 000.00	-1 600.00	0.531 0	0.577 0	0.025 0	0.994 8	0.031 2	0.126 6	0.048 6

第四节 雷电冲击高电压测量系统校准

雷电冲击电压测量系统校准应按照国家标准 GB/T 16927.2—1997《高电压试验技术 第二部分 测量系统》进行。

雷电冲击电压测量系统由高压冲击分压器、传输电缆和指示或记录仪器组成。本节所述的校准是指整套系统的校准,系统的校准是在各部件校准的基础上进行的。

1 对测量系统的要求

国家标准 GB/T 16927.2—1997 规定了测量系统的一般要求为:

(1)测量冲击全波峰值的总不确定度为 $\pm 3\%$ 范围内。

(2)测量冲击截波的总不确定度取决于截断时间 T_c 。

当 $0.5\mu s \leq T_c < 2\mu s$ 时,总不确定度为 $\pm 5\%$ 范围内,当 $T_c \geq 2\mu s$ 时,总不确定度为 $\pm 3\%$ 范围内。

(3)测量冲击波形时间参数的总不确定度为 $\pm 10\%$ 范围内。

2 校准方法

2.1 校准试验接线

按图 28-2 接线。

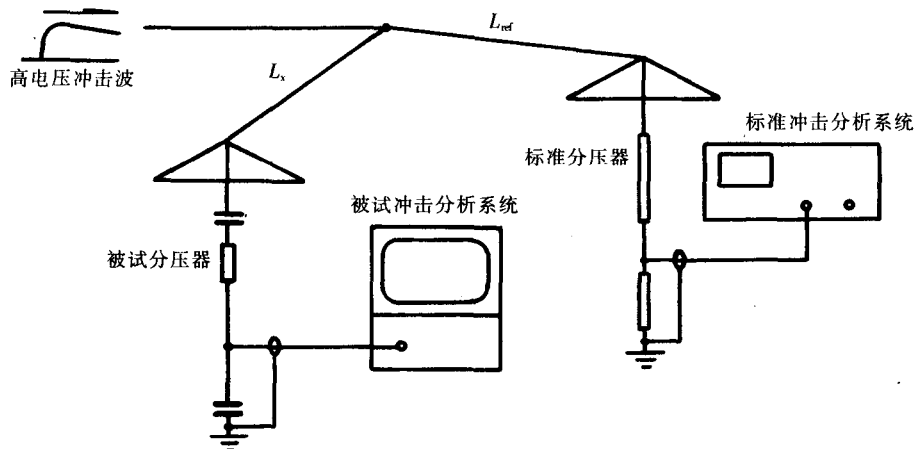


图 28-2 冲击测量系统比对试验接线图

2.2 标准冲击测量系统和被试冲击测量系统

2.2.1 标准冲击测量系统

由标准冲击分压器、标准冲击分析系统及传输电缆等组成。标准冲击分析系统必须经过校准并在有效期内。

标准冲击分压器技术参数:额定电压至少要大于被试冲击测量系统额定电压的 20%,分压比与标准冲击分析系统相配。标准冲击分析系统用标准冲击波校准器校准,满足 IEC 1083-1 的要求,在有效期内。

2.2.2 被试冲击测量系统

由冲击电容分压器、冲击分析系统及传输电缆等组成。冲击分析系统用标准冲击波校准器校准,满足 IEC 1083-1 标准的要求,并在有效期内。

2.3 测量系统的放置

比对试验时,两个分压器的安放位置相对于冲击电压发生器等设备应保证对称,两个分压器和冲击电压发生器在同一点接地。高压引线的长度 L_{ed} 和 L_x 应相同。

2.4 冲击波形

雷电全波 1.2/50 μs

雷电截波 0.5 μs 波前截断

操作波 20/4 000 μs

2.5 冲击波峰值电压

按照 GB/T 16927.2—1997 标准的规定,校准试验最好在额定电压下,至少应在不低于 20%额定电压或电流下进行。根据高压试验室的具体情况,冲击波最高峰值电压可选标准冲击分压器的额定电压。如标准冲击分压器的额定电压小于被测冲击分压器额定电压的 20%,则本次校准只对 5

倍标准分压器额定电压及以下满足 IEC 标准要求的。例如,标准分压器的额定电压为 200kV,而被测冲击分压器的额定电压为 1 200kV,则只能说被测冲击分压器的 1 000kV 及以下得到了校准。

3 校准程序

(1)施加上述选定的最高峰值电压值的正极性冲击波 10 次,记录两套测量系统测量的 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 值。

(2)施加上述选定的最高峰值电压值的负极性冲击波 10 次,记录两套测量系统测量的 U_p 、 T_1 、 T_2 、 T_c 值。

(3)按照 GB/T 16927.2—1997 计算被试冲击测量系统的刻度因数 F_i 、 F_m 和标准偏差。

$$F_i = \frac{U_{ps}}{U_{px}}$$

式中 U_{ps} ——标准测量系统冲击波峰值读数;

U_{px} ——被试测量系统冲击波峰值读数。

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (28-9)$$

刻度因数的标准偏差为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (28-10)$$

刻度因数的偏差应满足:

$$S = \frac{s}{F_m} \leq 1\% \quad (28-11)$$

(4)冲击测量系统的线性度试验应在每一极性下用同一种波形进行。雷电冲击全波可用来确定雷电冲击截波用测量系统的线性度。线性度试验应在上述选定的最高峰值电压和最小峰值电压以及其间三个大致等分値下,按 1、2、3 步骤,测量被试冲击测量系统的刻度因数 F_m ,测得值的变化不超过其平均值的 $\pm 1\%$ 为满足要求。

4 校准实例

国内某高压试验室进行了一次冲击测量系统的校准。标准测量系统由 HAEFELY R500EF 标准分压器、Nicolet Power Pro 620 冲击分析系统及传输电缆等组成。Nicolet Power Pro 620 经标准冲击校准器 RIC-422 校准。在有效期内,满足 IEC 1083-1 的要求。被试冲击测量系统由 SJTU1800 冲击电容分压器、ATS-4 冲击分析系统及传输电缆组成。ATS-4 冲击分析系统,也经标准冲击校准器 RIC-422 校准,在有效期内,满足 IEC 1083-1 的要求。

校准试验接线和试区布置完全按本节 2 中的要求。

校准数据见表 28-5 标定刻度因数的确定。

第五节 局部放电测量系统和校准器的校准

局部放电测量系统是测量高压电器设备局部放电的设备,理所当然地要进行校准。局部放电测量系统包括耦合装置、传输系统和测量仪器。一般,传输系统不会对回路特性产生影响,不予考虑校准。一个完整试验回路中的测量系统和测量系统性能试验都要用脉冲校准器。所以,局部放电测量系统和脉冲校准器都必须进行校准检定。

1 脉冲校准器的校准

表 28-5 标定刻度因数的确定

雷电波:1.2/50 μ s,75kV

序号	极性	标准系统	被试系统	刻度因数	标准偏差 $s/\%$	标准系统的时间		被试系统的时间		时间参数的偏差			
		U_p/kV	U_p/kV	F_i		$T_1/\mu\text{s}$	$T_2/\mu\text{s}$	$T_3/\mu\text{s}$	$T_2/\mu\text{s}$	$T_1/\%$	$T_1/\%$	$T_2/\%$	$T_3/\%$
1	-	75.62	75.9	0.996 3	0.296 533 1	1.120	53.96	1.18	55.1	5.36	0.536 9	2.113	0.158 6
2	-	76.28	75.9	1.005 0		1.123	53.22	1.18	55.2	5.08		3.720	
3	-	75.65	75.9	0.996 7		1.116	53.88	1.16	55.1	3.94		2.264	
4	-	75.71	76.0	0.996 2		1.114	53.93	1.18	55.1	5.92		2.169	
5	-	75.62	76.0	0.995 0		1.121	53.79	1.18	55.2	5.26		2.621	
6	-	75.61	75.9	0.996 2		1.124	53.76	1.18	55.3	4.98		2.865	
7	-	75.64	76.0	0.995 3		1.114	53.82	1.18	55.3	5.92		2.750	
8	-	75.57	75.9	0.995 7		1.125	53.91	1.18	55.3	4.89		2.578	
9	-	75.77	75.9	0.998 3		1.121	54.02	1.18	55.3	5.26		2.369	
10	-	75.66	76.0	0.995 5		1.124	53.99	1.18	55.2	4.98		2.241	
标定刻度因数					0.997 0								

序号	极性	标准系统	被试系统	刻度因数	标准偏差 $s/\%$	标准系统的时间		被试系统的时间		时间参数的偏差			
		U_p/kV	U_p/kV	F_i		$T_1/\mu\text{s}$	$T_2/\mu\text{s}$	$T_3/\mu\text{s}$	$T_2/\mu\text{s}$	$T_1/\%$	$T_1/\%$	$T_2/\%$	$T_3/\%$
11	+	75.85	76.1	0.996 7	0.250 450 3	1.126	53.39	1.19	56.5	5.68	0.354 9	5.825	0.709 2
12	+	75.35	75.5	0.998 0		1.132	54.14	1.19	55.3	5.12		2.143	
13	+	75.19	75.4	0.997 2		1.161	54.06	1.19	55.3	2.50		2.294	
14	+	75.19	75.5	0.995 9		1.155	54.31	1.19	55.3	3.03		1.823	
15	+	75.25	75.4	0.998 0		1.153	54.23	1.18	55.3	2.34		1.973	
16	+	75.24	75.4	0.997 9		1.158	54.34	1.19	55.2	2.76		1.583	
17	+	75.19	75.5	0.995 9		1.161	53.99	1.19	55.3	2.50		2.426	
18	+	75.21	75.5	0.996 2		1.170	54.26	1.19	55.2	1.71		1.732	
19	+	75.33	75.4	0.999 1		1.185	54.22	1.18	55.3	-0.42		1.992	
20	+	75.83	75.5	1.004 4		1.172	53.66	1.19	55.2	1.54		2.870	
标定刻度因数					0.997 9								

注:环境条件:16℃(温度);相对湿度:28%。

1.1 脉冲校准器的性能要求

脉冲校准器能产生局部放电测量系统校准用的电流脉冲。脉冲校准器由能产生幅值为 U_0 的阶跃电压脉冲发生器和电容 C_0 串联构成。因此,每一个校准脉冲产生的电荷值为:

$$q_0 = U_0 \cdot C_0$$

实际上,不可能产生一个理想的阶跃电压脉冲,具有一定上升时间 t_r (峰值的 10% 到 90% 之间的时间) 和有限衰减时间 t_d (峰值的 90% 到 10% 之间的时间) 的其他波形实际上也可以注入相同的电荷量。

校准脉冲可以是一系列具有快速上升时间和缓慢衰减时间的电压脉冲 (单极性 or 双极性), 也可以是经校准电容 C_0 有效积分的矩形脉冲链。

1.1.1 校准器输出的电荷量 q_0

其不确定度保持在标称值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 1\text{pC}$, 取两者中大的一个。

1.1.2 上升时间 t_r

发生器的电压脉冲的上升时间 t_r 应小于 60ns。对于上限频率 f_2 高于 500kHz 的宽带测量系统, 必须满足 $t_r \leq 0.03/f_2$ 的要求。其不确定度为 $\pm 10\%$ 。

1.1.3 脉冲衰减时间 t_d

脉冲衰减时间 $t_d > 1/f_1$, f_1 为测量系统的下限频率。

1.1.4 脉冲电压幅值

对于矩形脉冲发生器,脉冲电压的幅值 U_0 在脉冲之间的时间间隔内的变化应不大于 5%。

1.1.5 脉冲重复频率 N

校准脉冲发生器每秒产生的脉冲数。其不确定度为 $\pm 1\%$ 。这一要求仅适用于脉冲重复率 N 的读数的校准。

1.2 脉冲校准器的校准方法

脉冲校准器需校准的最主要的指标是标称电荷量 q_0 。它是用于局放定量校准的标准量。其他性能指标只要满足要求就可以了。

1.2.1 标称电荷量 q_0 的校准

因为 $q_0 = U_0 \cdot C_0$, 所以, 可以采用分别校准 U_0 和 C_0 的方法来标定 q_0 。原机械工业部计量检定规程 JJG(机械)145-93《局部放电检测装置》中规定了这种校准方法:

(1) 用准确度好于 $\pm 1.0\%$ 频宽大于 100MHz 的模拟示波器或数字示波器测量 U_0 的值。应测量 10 次, 取其平均值。

(2) 用准确度好于 $\pm 0.5\%$ 的电容电桥或其他仪表测量 C_0 的值。也测量 10 次, 取其平均值。

(3) 标称电荷量: $q_0 = U_0 \cdot C_0$

(4) 每一标称电荷量均要校准。满足其不确定度不大于其标称值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 1\text{pC}$ 时为合格。记录标称电荷量的实际值, 以备实际校准时使用。

当脉冲校准器的 U_0 和 C_0 不能单独校准时, 应将被校脉冲校准器产生的电荷与标准校准器产生的电荷进行比较, 应用相同的测量系统对上述两种电荷量进行测量和比较。标准校准器应溯源到国家基准。所用的测量系统可以是满足 IEC 60270:2000 标准的局部放电测量系统或者是具有积分能力的数字示波器或者是电子积分仪器。试验结果应由至少 10 次测量的平均值来确定。这种方法已在 IEC 60270:2000 标准中按标准方法作了明确的规定。

如果没有溯源到国家标准的标准校准器, 则可采用替代方法对脉冲校准器进行校准。

如图 28-3 所示, 被校准器的输出端应跨接一个电阻 R_m , 校准器产生的脉冲电流 $i(t)$ 流经 R_m 产生的电压降 $U_m(t)$ 由已校正的、具有积分能力和带宽不小于 50MHz 的数字示波器进行测量。 R_m 的值宜在 50Ω 到 200Ω 内选择, 校准器到 R_m 及示波器的连接线要短。示波器的输入阻抗可能会影响 R_m 的值。如脉冲幅度足够大, 推荐经 10:1 探头输入示波器, 以减少示波器输入阻抗对 R_m 值的影响。试验回路, 包括测量电阻 R_m , 应达到在所用的积分时间内记录波形的振荡衰减到小于平均阶跃幅值的 2%。试验结果应由至少 10 次测量的平均值来确定。

校准器产生的电荷 q 为:

$$q = \int i(t) dt = \frac{\int U_m(t) dt}{R_m} \quad (28-12)$$

式中, 用 $C_0 = 141\text{pF}$ 以及 $R_m = 33\Omega$ 和 $R_m = 200\Omega$ 的校准器分别记录的两种典型的 $U_m(t)$, 见图 28-4。

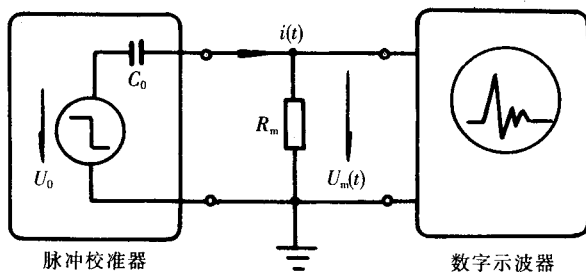


图 28-3 测量回路

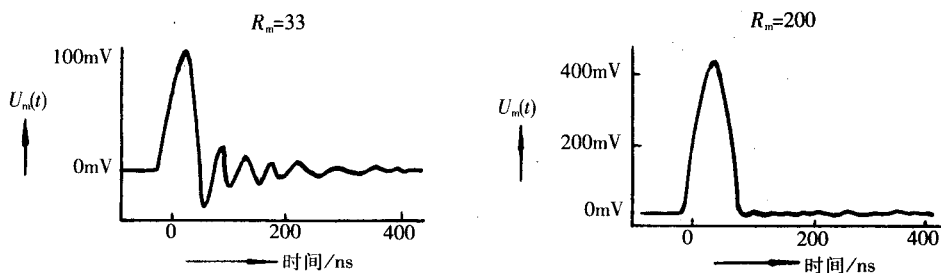


图 28-4 测量电阻 $R_m=33$ 和 $R_m=200$ 时典型校准器的校准脉冲 $U_m(t)$ ($q=100\text{pC}$)

过低的 R_m 值会导致电压脉冲的振荡,同时会导致大的积分误差。

一般, $U_m(t)$ 的积分 $\int U_m(t)dt$ 由数字示波器内装的算法程序进行计算,由于这类积分方法的精度可能不知道,这时,可用一幅值为 U_{ref} 的阶跃波电压源与一标准电容 C_{ref} 的串联代替被试校准器来校准数字示波器和用于计算 q 的方法。因此产生了与被试校准器波形和电荷相同的电流脉冲 $i(t)$, 于是有

$$q_{\text{ref}} = U_{\text{ref}} \times C_{\text{ref}} \quad (28-13)$$

这一标准电荷值 q_{ref} 为已知,其不确定度仅由 U_{ref} 和 C_{ref} 的不确定度给定。这样可用于校核上述积分程序。

1.2.2 脉冲校准器输出波形上升时间 t_r 的测量

将脉冲校准器的输出波形输入频宽 100MHz 以上的模拟示波器或数字示波器的 Y 轴输入端。调好触发后,在示波屏上测量峰值的 10% 到 90% 的时间 t_1 ,则脉冲校准器的上升时间:

$$t_r = \sqrt{t_1^2 - t_0^2} \quad (28-14)$$

式中, t_0 为示波器 Y 轴的上升时间,由示波器的技术说明书提供。

测量时,信号必须经 10:1 探头接入示波器,以减少示波器输入阻抗对测量的影响。探头宜直接接到波形的输出端以免引线的影响。

脉冲校准器输出波形衰减时间 t_d 可同时测得。

1.2.3 脉冲重复频率 N 的测量

将脉冲校准器的输出波形输入 $\pm 0.1\%$ 准确度的频率计或脉冲计数器,测量脉冲重复频率 N 。

2 局部放电测量系统的校准

2.1 对局部放电测量系统的性能要求

局部放电测量仪器与耦合装置组成局放测量系统。所以,对局放测量系统的性能要求应包括耦合装置在内。

2.1.1 传输阻抗 $Z(f)$

输出电压幅值和一恒定输入电流幅值的比,当输入是正弦波时 $Z(f)$ 是频率 f 的函数。

2.1.2 下限频率 f_1 和上限频率 f_2

测量系统的中心频率:

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (28-15)$$

而带宽定义为:

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (28-16)$$

对于宽带局放测量系统,推荐: $30\text{kHz} \leq f_1 \leq 100\text{kHz}$, $f_2 \leq 500\text{kHz}$, $100\text{kHz} \leq \Delta f \leq 400\text{kHz}$ 。

不同耦合装置配同一测量仪器可以改变传输阻抗,其总的频率响应符合推荐值。

2.1.3 脉冲分辨时间 T_r

两个持续时间极短、波形和极

性相同、电荷量相同的相继输入脉冲之间的最短时间间隔,在这一时间间隔中脉冲响应幅值的变化不大于单个脉冲幅值的 10%。

2.1.4 脉冲序列响应

测量系统对由已知脉冲重复频率 N 的许多等距离及等幅度的大脉冲电荷 q_0 组成的脉冲序列的响应应为仪器的读数 R ,对于不同的 N , R 的读数见表 28-6。此时仪器的量程和增益假定能调整到能读出满刻度或 $N=100$ 的 100% 显示。

2.1.5 刻度因数 k 的线性度

刻度因数 k 与仪器的读数相乘得到输入量值的系数。刻度因数 k 的线性度应在要测量的规定局放最低值的 50% 到最高值的 200% 进行检验。为了保证测量系统的线性度, k 的变化应在 $\pm 5\%$ 以内。

2.2 局部放电测量系统的

校准方法

局部放电测量系统的校

准要包括耦合装置在内。这样才能检验整套测量系统的性能。

2.2.1 传输阻抗 $Z(f)$ 和上、下限频率 f_1 f_2 的确定

先按图 28-5 接线。

(1) 被测系统由耦合装置和 PD 检测仪组成;示波器选用准确度较高的数字示波器,尽量采用光标读数;

(2) 打开耦合装置低压末端与接地端的连接片,并在其间接入电阻 R_s ,流经耦合装置的正弦电流 $i(t)$ 在电阻 R_s 上形成电压降 $u(t)$,由示波器的 CH1 测量, $u(t)=i(t) \cdot R_s$,故 $i(t)=\frac{u(t)}{R_s}$,电流幅值 $I=\frac{U}{R_s}$;PD 检测仪的 Y 输出电压接到示波器的 CH2 输入端,以测量该系统的输出电压幅度 U_0 。

(3) 某个频率下的传输阻抗

$$Z=\frac{U_0}{I} \quad (28-17)$$

(4) 在测量系统的中心频率 f_m 处测出 Z_m ;然后,升高和降低正弦电流 $i(t)$ 的频率同时维持电流幅值 I 不变,测量 U_0 ,按上式计算 Z 的值,直至 Z 降至 Z_m 的 20dB。取 Z 下降至 6dB 时的低、高频率为测量系统的下限频率 f_1 和上限频率 f_2 。根据 Z 的数据画出的以频率 f 为 X 轴的曲线,这就是不同频率下的传输阻抗 $Z(f)$,它是频率的函数。

2.2.2 刻度因数 k 及其线性度的确定

刻度因数 k 是对被测的视在电荷量而言的,所以,用校准脉冲发生器注入电荷量的方法来测

表 28-6 局放测量系统的脉冲序列响应

$N/1 \cdot s^{-1}$	1	2	5	10	50	≥ 100
$R_{\text{测}}/\%$	35	55	76	85	94	95
$R_{\text{真}}/\%$	45	65	86	95	105	105

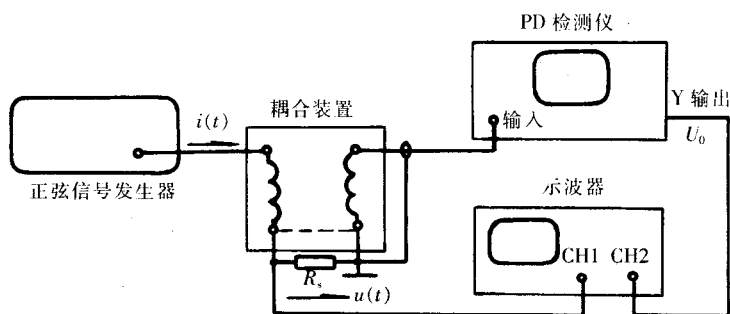


图 28-5 确定 $Z(f)$ 的接线图

定。

(1)用于测定 k 的脉冲校准器应能输出可变的局放校准信号,取低的脉冲重复频率(约 100 次)。

(2)在满量程的 10%到 100%范围内,至少取 3 个不同的电荷值,确定测量系统的刻度因数 k 。 k 的变化范围就代表了测量系统刻度因数的线性度。 k 的变化范围应满足 $\pm 5\%$ 的要求。

刻度因数为:

$$k = \frac{q_s}{q_d} \quad (28-18)$$

式中 q_s ——校准脉冲发生器的标准电荷量;

q_d ——测量系统读数。

如:在 100pC 量程,分别注入 100、50、20pC 的标准电荷量,测量系统相应读得 3 个读数 102、49、19 的放电量,则刻度因数 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 0.980 3、1.020 4、1.052 6, k 的变化范围在 $\pm 5\%$ 以内,满足要求。

(3)如果局放脉冲校准器输出校准信号的变化范围足够大,刻度因数及其线性度应在规定被测的局放最低值的 50%到最高值的 200%范围内进行校准。

2.2.3 脉冲分辨时间的测量

脉冲分辨时间应在测量系统合适的量程上进行。用两输出脉冲时间间隔 Δt 可调的双脉冲发生器作为校准的信号源。

将双脉冲发生器的输出端与测量系统的输入端相连,双脉冲的时间间隔 Δt 置 200 μ s,脉宽置 1 μ s;调脉冲幅度至测量系统读数为满度值附近,记为 D。

维持脉冲幅度不变,减小双脉冲的时间间隔 Δt ,至读数为 $D \pm 10\%$,此时的 Δt 即为脉冲分辨时间。

脉冲分辨时间一般与测量系统的带宽 Δf 成反比,它是测量系统分辨连续局放现象能力的表征。

应该对与测量仪器所配的所有耦合装置及在每一耦合装置所用最小和最大的电容值下测定脉冲分辨时间。

2.2.4 脉冲序列响应的测量

将脉冲幅度相同、脉冲重复频率 N 不同的校准脉冲输入测量系统,不同脉冲重复频率 N 下的视在电荷 q 的读数 R 的变化应符合表 28-1 的值。

所有量程均应满足表 28-1 的要求。

第二十九章 测量系统误差及测量不确定度

第一节 概 述

根据国家标准 GB1094 规定,每台变压器出厂前都要进行例行试验;每种新产品都要进行型式试验和特殊试验。例行试验包括外施耐压试验、感应耐压试验、空载损耗和负载损耗测量等;型式试验包括雷电冲击试验、温升试验。对于外施和感应耐压试验的试验电压应采用一套工频电压测量系统,如电容分压器测量系统进行测量;对于空载损耗和负载损耗应采用一套损耗测量系统进行测量;对于雷电冲击试验电压应采用一套冲击电压测量系统进行测量。本章仅对工频电压测量系统、空载损耗和负载损耗测量系统的测量误差进行论述。

测量系统的测量误差主要由随机误差(也称偶然误差)、系统误差和粗大误差(也称疏忽误差)组成。随机误差表示在多次测量中以不可预知方式变化的误差分量,该误差不可校正,但可通过增加观测次数减小,并可按照正态分布的规律用数理统计的方法求出一组或多组数据的标准偏差。系统误差表示在多次测量中保持恒定或以可预知方式变化的误差分量,该误差可校正,也可通过改变测量方式予以减小,并可用最大误差及其传递原理进行最大误差的计算及分析。粗大误差是由实际操作错误、使用工具有缺陷或读数、记录错误等原因造成,该误差可用拉伊达(Panta)、肖维勒(Ehauvener)准则等方法予以剔除。

由于随机误差的影响因素是随机的,所以,对于一个固定的测量系统,其随机误差仅适用于多次试验、多次测量事件。对于上述三种测量系统的随机误差一般也可以采用多次试验和多次测量的方法统计求出。对于随机误差,本章仅从理论上做一些论述,而对系统误差除从理论上进行一些论述外,还对实际产生的系统误差进行一些计算及分析。

关于测量不确定度问题,1993年IEC、ISO等国际组织曾制订并发布了《测量不确定度表达指南》。我国也于1999年发布了JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》,并取代了JJG1027—1991《测量误差及数据处理》中的有关误差部分。新标准明确提出测量不确定度和测量误差是两个不同的概念。测量不确定度是建立在观测数据和估算数据基础之上的,是可操作的、具体的;而测量误差是建立在真值(被测量之值)基础之上的理想概念,是未知的。测量不确定度的定义是表征被测量值所处范围(分散性)的评定,测量误差的定义是测量结果与其真值之差,可见两者是有很大区别的。其主要区别如下。

(1)测量误差有正、负号,其值为测量结果减去被测量的真值;测量不确定度无符号,其值为标准差或标准差的倍数或置信区间的半宽。

(2)测量误差是客观存在,它不因人的认识程度而改变;测量不确定度与人对被测量、影响量及测量过程的认识有关。

(3)测量误差只能用约定真值代替真值时得到其估计值;测量不确定度则可根据实验、经验和有关资料等信息进行定量评定。

(4)测量误差可用来对测量结果进行修正;测量不确定度不能用来对测量结果进行修正。

(5)测量误差可分为随机误差和系统误差两大类;测量不确定度一般不必区分其性质。而且对于那些尚未认识的系统效应,是不可能在不确定度评定中予以考虑的。

(6)测量误差是一个表示测量结果偏离真值的差值;测量不确定度只表示被测量值的分散性。

但测量误差和测量不确定度又是有机联系的,即测量误差是测量不确定度表达的基础,测量不确定度是误差理论的一项重要应用。

长期以来,误差和误差分析已成为评价测量结果质量的重要部分,但实际上一般测量结果的误差是未知的,因此用误差来定量评定测量结果的质量也是不科学、不合理的。用测量不确定度来定量评定测量结果的质量,由于它既可以估算,又使测量结果具有可比性,所以越来越多地被应用到很多领域的测量中。但是,由于各种测量的计算和表达方法不同,尤其是在世界范围内计算和表达方法不尽统一,加上广大测试人员对测量不确定度的计算和应用还不够熟悉,还不能完全掌握,因此,对于检测实验室中比较复杂的测量系统,测量不确定度的计算及应用还受到一定的限制,还不能在所有的领域和所有的测量系统中广泛应用。根据 ISO/IEC 17025:1999 和 GB/T 15481-2000《检测和校准实验室能力的通用要求》标准要求,对于校准实验室,在对测量仪器仪表进行校准或检定中必须给出其测量不确定度。对于检测实验室,当客户有要求或不确定度与检测结果的有效性有关、不确定度影响到对规范限度的符合性时也必须给出测量不确定度。

本章仅从理论上对测量不确定度的概念、分类、可能来源及计算方法进行一些论述,各有关实验室可根据有关标准及本章论述的计算方法对本实验室所使用的测量系统的测量不确定度进行一些具体的计算和探讨。

第二节 间接测量的误差分析

对于不超过电压表、电流表等仪表量程范围的电压、电流等测量,可采用直接法测量,此时的测量误差由测量仪表的准确度、最大量程和实际的测量范围决定。

对于不能采用直接法测量的参数,如本章论述的工频高电压的测量,变压器空载、负载损耗的测量则只能采用间接法测量。间接测量的随机误差可以用多次测量的统计标准差来表示。间接测量的系统误差由多个环节组成,每个环节的系统误差有大有小,有正有负,在分析计算系统误差时,可根据不同的函数关系、利用不同的方法进行分析计算。

1 随机误差

随机误差一般服从一定的统计规律,正态分布是一种常见的分布,其一般正态分布的概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \quad (29-1)$$

式中 σ ——正态分布的标准偏差,可用统计标准偏差 S 表示;

a ——正态分布的数学期望值,可用统计平均值 \bar{X} 表示。

当 $a=0, \sigma=1$ 时称为标准正态分布,其概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (29-2)$$

正态分布的图形如图 29-1。

对于一个变量的一组试验数据 x_i ,如经过检验(可用 W 检验法进行检验)该组数据符合正态分布,则可采用贝塞尔(Bessel)法计算该组试验数据的平均值 \bar{x} 和标准偏差 S 。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (29-3)$$

$$S = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (29-4)$$

式中 x_i ——试验数据;

n ——试验数据个数。

当测量数据较多时, S 也可以采用佩特斯法、极差法或最大误差法进行计算, 但一般情况下多采用贝塞尔法计算, 因为该方法的准确度较高。

2 系统误差

系统误差的分析计算, 首先应根据实际测量系统建立间接被测量与各直接被测量之间的函数关系, 如 $y=f(x)$, 并对 $y=f(x)$ 进行全微分和对数微分, 分别求出绝对误差和相对误差的计算公式; 第二步根据直接被测量所用测量仪表的准确度、量程和实际测量范围等求出各直接被测量的最大误差; 最后再计算出间接被测量的最大绝对误差和最大相对误差。计算时考虑到实际测量误差的正、负是未知的, 所以, 为了保证实际测量误差不致超过可能的最大值, 故不论实际测量误差是正还是负, 均按直接被测量最大误差的绝对值相加来计算。

2.1 简单函数关系

当间接被测量与各直接被测量之间为简单函数关系时, 间接被测量的最大误差可采用直接被测量的最大误差的绝对值相加来计算。如函数 $y=x_1+x_2$; $y=x_1 \cdot x_2$; $y=x_1-x_2$; $y=\frac{x_1}{x_2}$, 则 y 的最大测量误差 $\delta_y = \pm(|\delta_{x_1}| + |\delta_{x_2}|)$ 。

2.2 复杂函数关系

当间接被测量与各直接被测量为复杂函数关系时, 如复杂的指数加乘除关系, 则间接被测量的最大测量误差应采用如下所述的微分方法进行计算。

2.2.1 用全微分方法分析计算绝对误差

设间接被测量与各直接被测量的函数关系为 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 对该函数进行微分得:

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot dx_n \quad (29-5)$$

将式 (29-5) 中的 dy 和 dx_1, dx_2, \dots, dx_n 分别用 y 的绝对误差 Δy 和 x 的绝对误差 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 代替, 则式 (29-5) 变为:

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n \quad (29-6)$$

式中, $\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1, \frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta x_2, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta x_n$ 分别为 x_1, x_2, \dots, x_n 对 y 的局部误差。

当式 (29-6) 中的 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 中有正有负时, 应采用局部误差的绝对值相加。

2.2.2 用对数微分方法分析计算相对误差

根据等式两边同除以相同量仍相等的原则, 将式 (29-5) 两边同除以 y 得:

$$\frac{dy}{y} = \frac{\partial f}{f} \cdot \frac{1}{x_1} \cdot dx_1 + \frac{\partial f}{f} \cdot \frac{1}{x_2} \cdot dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{f} \cdot \frac{1}{x_n} \cdot dx_n \quad (29-7)$$

设相对误差为 δ , 并用对数表示, 则式 (29-7) 变为:

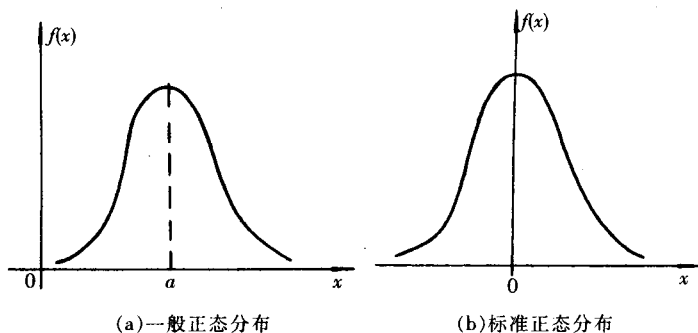


图 29-1 正态分布图

$$\delta_y = d(\ln y) = \frac{\alpha(\ln f_1)}{\alpha x_1} \cdot dx_1 + \frac{\alpha(\ln f_2)}{\alpha x_2} \cdot dx_2 + \cdots + \frac{\alpha(\ln f_n)}{\alpha x_n} \cdot dx_n \quad (29-8)$$

$$\begin{aligned} \text{即: } \delta_y &= \frac{\alpha(\ln f_1)}{\alpha x_1} \cdot \Delta x_1 + \frac{\alpha(\ln f_2)}{\alpha x_2} \cdot \Delta x_2 + \cdots + \frac{\alpha(\ln f_n)}{\alpha x_n} \cdot \Delta x_n \\ &= \frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} + \cdots + \frac{\Delta x_n}{x_n} = \delta_{x_1} + \delta_{x_2} + \cdots + \delta_{x_n} \end{aligned} \quad (29-9)$$

当 $\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \cdots, \delta_{x_n}$ 有正有负时, 应采用 $\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \cdots, \delta_{x_n}$ 的绝对值相加。

例如电能 $W = I^2 R t$, 其中 I, R, t 为直接被测量, W 为间接被测量, 求 W 相对误差的计算公式。

两边取对数得:

$$\ln W = 2 \ln I + \ln R + \ln t$$

微分得:

$$\frac{dW}{W} = 2 \times \frac{dI}{I} + \frac{dR}{R} + \frac{dt}{t}$$

$$\text{即: } \delta_W = 2 \times \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta t}{t} = 2 \times \delta_I + \delta_R + \delta_t$$

第三节 工频电压测量系统的误差分析

工频电压测量系统有球极测量系统、标准电压互感器测量系统和电容分压器测量系统。目前使用比较广泛、比较方便的是电容分压器测量系统。该系统由转换装置、传输系统和低压指示仪表或记忆仪器组成。因为传输系统一般由同轴屏蔽电缆等组成, 所以传输系统也可以并入转换装置中。低压指示仪表一般采用工频峰值电压表。

工频电容分压器测量系统的系统误差由两部分组成, 一部分是转换装置的刻度因数(分压比)的误差, 另一部分是低压指示仪表的误差。

根据 GB/T 16927.2—1997《高电压试验技术 第二部分 测量系统》标准的要求, 测量峰值或有效值电压的总不确定度应在 $\pm 3\%$ 范围内, 其中转换装置的刻度因数(分压比)的变化不应超过 $\pm 1\%$; 测量仪表的准确度应达 0.5 级; 使用工频峰值电压表时, 其不确定度不应超过 $\pm 1\%$ 范围。如果实际使用的测量系统可以满足上述要求, 则被测试电压值的测量误差(实测值与真值之差)即可满足 GB/T 16927.1—1997《高电压试验技术 第一部分 一般试验要求》标准中关于试验电压容许偏差(实测值与规定值之差)的规定; 在整个试验过程中试验电压测量值的容许偏差应不超过 $\pm 1\%$; 当试验持续时间超过 60s 时, 试验电压测量值的容许偏差应不超过 $\pm 3\%$ 。

刻度因数(分压比)的误差决定于刻度因数(分压比)的校正方法。一般校正方法有计算法和电桥法。同时测量测量系统的输入和输出量, 或者分别测量测量系统高压臂和低压臂的等效电容, 然后计算刻度因数(分压比)的方法称为计算法。该方法受使用电压、温度和对地杂散电容的影响。另一种校正方法是电桥法, 即采用某种桥式回路, 使被测测量系统的输出与一个可调的、准确度较高的标准测量系统的输出相平衡, 此时, 被测测量系统的刻度因数与标准测量系统的刻度因数相同。

由于目前各试验室不具备可调的、准确度较高的标准测量系统, 所以, 一般均采用计算法计算刻度因数。本章亦仅对计算法产生的刻度因数(分压比)的系统误差和高电压测量值的系统误差进行计算及分析, 且计算分析以一台 750kV 电容分压器测量系统为例(其他电容分压器测量系统亦适用)。该测量系统高、低压臂均为油纸电容器, 低压侧量仪表为 200V(满量程)、0.1 级、7151 型数字电压表。

1 测量高、低压臂等效电容计算法

1.1 高压臂等效电容 C_{1d} 测量

为了消除杂散电容、使用电压等因素对 C_{1d} 的影响,测量电压应在实际使用电压范围内的最大、最小和中间三个大致相等的电压下进行;测量时的周围环境、条件应尽量和实际使用时保持相同。

对于温度的影响,由于 750kV 电容分压器测量系统的高、低压电容器均为油纸电容器,所以,高、低压臂电容器的温度系数基本相同,故温度对分压比的影响可忽略不计。

C_{1d} 测量电压为 110kV~504kV,测量设备为瑞士 Tettex 公司进口的 3370/1000 型标准电容器和 2801 电桥。 C_{1d} 计算采用以下公式:

$$C_{1d} = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3 + S} \quad (29-10)$$

式中 C_N ——标准电容器电容, pF;

R_4 ——2801 电桥固定桥臂电阻, Ω ;

R_3 ——2801 电桥可调桥臂电阻, Ω ;

S ——2801 电桥微调电阻(R_3 臂), Ω 。

1.2 低压臂(包括屏蔽电缆)等效电容 C_{2d} 测量

C_{2d} 测量可以采用 0.2 级精密万用电桥,也可以采用标准电容器和 2801 电桥。本章采用 0.2 级精密万用电桥。

1.3 分压比计算

分压比 K 可采用以下公式计算:

$$K = \frac{C_{1d} + C_{2d}}{C_{1d}} = 1 + \frac{C_{2d}}{C_{1d}} \quad (29-11)$$

测量及计算结果见表 29-1。

1.4 最大误差计算

1.4.1 分压比 K 的误差计算

由于 C_{1d} 是在 110kV~504kV 电压下采用标准电容器和 2801 电桥测量的,所以, C_{1d} 的误差由两部分组成,一部分是使用电压变化引起的电容值变化的影响 $\delta_{C_{1du}}$, 根据实际测量,电压由 110kV 升到 504kV 时, C_{1d} 由 260.50pF 增加到 260.62pF, 增大了 0.046%, 由此可计算出额定电压 750kV 下 C_{1d} 增大值将为 0.069%, 即电压变化引起的影响 $\delta_{C_{1du}}$ 为 $\pm 0.069\%$; 第二部分是标准电容器电容值本身误差和 2801 电桥标准电阻值本身误差引起的测量误差 $\delta_{C_{1dm}}$ 。

$\delta_{C_{1dm}}$ 计算:

按照第二节 2.2 项对数微分求相对误差的方法,将式(29-10)两边取对数,然后微分推导可得 $\delta_{C_{1dm}}$ 的计算公式如下:

$$\delta_{C_{1dm}} = \delta_{C_N} + \delta_{R_4} - [\delta_{R_3}(100) \times R_3(100) + \delta_{R_3}(10) \times R_3(10) + \delta_{R_3}(1) \times R_3(1) + \delta_S \times S] \times \frac{1}{R_3 + S} \quad (29-12)$$

式中 $R_3(100)$ 、 $R_3(10)$ 、 $R_3(1)$ 、 S ——分别为 2801 电桥桥臂电阻 R_3 的百位、十位、个位和 S 位的实测电阻值, Ω ;

δ_{C_N} ——3370/1000 型标准电容器的电容误差, %;

δ_{R_4} ——2810 电桥桥臂电阻 R_4 的误差, %;

$\delta_{R_3}(100)$ 、 $\delta_{R_3}(10)$ 、 $\delta_{R_3}(1)$ 、 δ_S ——分别为 2801 电桥桥臂电阻 R_3 的百位、十位、个位和 S 位电阻的误差, %。

表 29-1 C_{1d} 、 C_{2d} 、 K 测量及计算结果

750kV 测量系统	C_{1d} /pF	C_{2d} /pF	K	备注
7 挡	260.5	741 090	2 846	测量温度
8 挡	260.5	1 091 090	4 189	26℃

由 3370/1000 型标准电容器和 2801 电桥说明书可知 δ_{C_N} 、 δ_{R_4} 、 $\delta_{R_3(100)}$ 、 $\delta_{R_3(10)}$ 、 $\delta_{R_3(1)}$ 、 δ_S 分别为 $\pm 0.05\%$ 、 $\pm 0.03\%$ 、 $\pm 0.03\%$ 、 $\pm 0.03\%$ 、 $\pm 0.1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ ，根据实测数据 $R_3=24\Omega$ ， $S=0.475\Omega$ ，利用式 (29-12) 并取各相对误差的绝对值相加，可计算出 $\delta_{C_{ldm}}=\pm 0.131\%$ 。

由此可得到 $\delta_{C_{ld}}$ ：

$$\delta_{C_{ld}}=\delta_{C_{ldu}}+\delta_{C_{ldm}}=\pm(0.069+0.131)\%=\pm 0.2\%。$$

分压比 K (7、8 挡) 的误差 δ_K 计算：

将式 (29-11) 两边取对数并微分得：

$$\delta_K=\delta_{C_{2d}}-\delta_{C_{ld}} \quad (29-13)$$

因 $\delta_{C_{ld}}$ 为负值，所以按异号处理所得误差最大，即

$$\delta_K=\pm(\delta_{C_{2d}}+|\delta_{C_{ld}}|)=\pm(0.2+0.2)\%=\pm 0.4\%$$

1.4.2 测量电压误差计算

当采用 750kV 测量系统和第三节 1.3 项求出的分压比测量高电压时，由于 $U_1=K \cdot U_2$ ，所以 U_1 的最大测量误差 δ_{U_1} 为：

$$\delta_{U_1}=\delta_K+\delta_{U_2} \quad (29-14)$$

式中 δ_{U_2} ——低压测量电压的最大相对误差，%。

δ_{U_2} 决定于低压测量仪表的测量准确度、量程和实际的测量范围，即：

$$\delta_{U_2}=\pm\alpha \cdot \frac{A_m}{A_x} \quad (29-15)$$

式中 $\pm\alpha$ ——低压测量仪表的准确度，%；

A_m ——低压测量仪表的最大量程，V；

A_x ——低压测量仪表的实测电压范围，V。

当低压测量仪表采用 0.1 级、200 伏 (量程) 电压表，实际测量范围为 20V~200V 时，则利用式 (29-15) 可计算出 δ_{U_2} 最大为 $\pm 1.0\%$ 。

故可计算出 δ_{U_1} 最大为 $\pm 1.400\%$ 。

以上 δ_K 、 δ_{U_1} 计算结果列于表 29-3。

2 测量高、低压输入、输出电压算法

2.1 高、低压输入、输出电压测量

高压输入电压 V_1 分别采用瑞士 Tettex 公司进口的 1000kV 电压测量设备和 800kV 标准电压测量装置进行测量 (也可采用标准规定的球隙等标准测量装置进行测量)；低压输出电压 V_2 采用 0.1 级、200 伏、7151 型数字电压表进行测量。 V_1 测量范围为 100kV~500kV，测量级数为 9 级。

2.2 统计分压比计算

统计分压比 \bar{K} 可采用以下公式计算：

$$\bar{K}=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_{1i}}{V_{2i}} \quad (29-16)$$

式中 n ——测量电压级数；

K_i ——每级电压下的计算分压比；

V_{1i} 、 V_{2i} ——每级电压下高、低压测量电压，kV。

\bar{K} 的计算结果见表 29-2。

2.3 最大误差计算

2.3.1 分压比 \bar{K} 的误差计算

2.3.1.1 1 000kV 电压测量设备

根据 1 000kV 电压测量设备说明书可知,该设备测

量准确度为 1%,所以,用该设备测量电压 V_1 的最大误差 $\delta_{V_1}=\pm 1\%$ 。又根据 750kV 测量系统低压测量用 0.1 级、200 伏 7151 型数字电压表的测量范围为 7 挡时 30V~170V,8 挡时 20V~120V,由此可用式(29-15)计算出 V_2 的最大误差, $\delta_{V_2(7\text{挡})}=\pm 0.667\%$; $\delta_{V_2(8\text{挡})}=\pm 1.0\%$ 。故可根据式(29-13)的方法求出 \bar{K} 的最大误差:

$$\delta_{\bar{K}(7\text{挡})}=\pm(1.0+0.667)\%=\pm 1.667\%$$

$$\delta_{\bar{K}(8\text{挡})}=\pm(1.0+1.0)\%=\pm 2.0\%$$

2.3.1.2 800kV 标准电压测量装置

根据 800kV 标准电压测量装置说明书,并经计算可知,该装置测量准确度为 0.5%,所以用该装置测量电压 V_1 的最大误差 $\delta_{V_1}=\pm 0.5\%$ 。又根据 750kV 测量系统低压测量用 0.1 级、200V7151 型数字电压表的测量范围为 7 挡时 30V~170V,8 挡时 30V~120V,由此可利用式(29-15)计算出 V_2 的最大误差 $\delta_{V_2(7.8\text{挡})}=\pm 0.667\%$ 。故 \bar{K} 的最大误差为 $\delta_{\bar{K}(7.8\text{挡})}=\pm(0.5+0.667)\%=\pm 1.167\%$ 。

2.3.2 测量电压误差计算

当采用 750kV 测量系统和第三节 2.2 项求出的统计分压比测量高电压时,可采用与第三节 1.4.2 项相同的方法计算出用两种校正分压比测量高电压时产生的测量电压误差。计算时,750kV 测量系统低压测量用 7151 型数字电压表的实测范围均按 20V~200V 考虑。

(1)用 \bar{K}_{1000} 测量时:

$$\delta_{V_1(7\text{挡})}=\pm(1.667+1.0)\%=\pm 2.667\%$$

$$\delta_{V_1(8\text{挡})}=\pm(2.0+1.0)\%=\pm 3.0\%$$

(2)用 \bar{K}_{800} 测量时:

$$\delta_{V_1(7.8\text{挡})}=\pm(1.167+1.0)\%=\pm 2.167\%$$

以上 δ_K 、 δ_{V_1} 计算结果列于表 29-3。

3 几点分析

(1)本章对 750kV 测量系统分压比和电压测量误差的分析计算方法对其他工频电压测量系统也是适用和可行的。

(2)由于本章对工频电压测量系统分压比和电压测量误差的计算采用了最大误差及其传递原理,所以,分压比和电压测量的实际误差将小于上述计算值。也就是说,无论采用上述三种方法的哪一种方法,其产生的分压比误差均将小于 $\pm 2.0\%$;产生的电压测量误差均将小于 $\pm 3.0\%$ 。

(3)对于工频电压测量系统,如果要想减小计算分压比和电压测量的系统误差,除了要采用高准确度的测量电桥和测量设备测量等效电容和高压电压外,测量系统低压测量仪表的准确度也应

表 29-2 \bar{K} 的计算结果

750kV 测量系统挡位	\bar{K}_{1000}	\bar{K}_{800}
7 挡	2 855	2 882
8 挡	4 198	4 243

表 29-3 $\delta_K(\delta_K)$ 、 δ_{V_1} 计算结果

750kV 测量系统 分压比	750kV 测量系统最大误差			
	$\delta_K(\delta_K)$		δ_{V_1}	
	7 挡	8 挡	7 挡	8 挡
\bar{K}	$\pm 0.4\%$	$\pm 0.4\%$	$\pm 1.4\%$	$\pm 1.4\%$
\bar{K}_{1000}	$\pm 1.667\%$	$\pm 2.0\%$	$\pm 2.667\%$	$\pm 3.0\%$
\bar{K}_{800}	$\pm 1.167\%$	$\pm 1.167\%$	$\pm 2.167\%$	$\pm 2.167\%$

足够高,且测量电压的范围应尽量达到仪表的最大量程,否则将使测量误差大为增加。如低压测量仪表的准确度为0.5级、量程为200V时,当测量范围在 $\frac{1}{2}$ 量程时,低压测量电压的测量误差为 $\pm 1\%$;而当测量范围在 $\frac{1}{4}$ 量程时,低压测量电压的测量误差则增大为 $\pm 2\%$ 。

(4)经验证明,采用有效值电压表(如7151型数字电压表)测量低压有效值电压仅适用于试验电压波形为近似标准正弦波形的情况。对于试验电压波形严重畸变的非标准正弦波形,低压必须采用能够测量峰值除 $\sqrt{2}$ 的工频峰值电压表。因为畸变严重的非标准正弦波形的波顶因数($K_a = \frac{A_m}{A}$)将随着波形的变尖而增大(畸变波形多为此种情况),此时 K_a 将大于 $\sqrt{2}$,有效值($A = \frac{A_m}{K_a}$)将减小。如果试验时以 A 乘分压比为准给试品加压,虽然有效值电压是按标准试验电压计算的,但此时峰值电压($A_m = K_a \cdot A$)却要超过标准试验电压。鉴于产品的绝缘破坏主要决定于峰值电压,所以,较高的峰值电压对产品的绝缘是不利的。

第四节 空载损耗测量系统的误差计算

按照GB1094.1—1996《电力变压器 第一部分 总则》规定,判定产品空载损耗(负载损耗)是否合格的允许偏差为不大于15%,但没有规定空载损耗(负载损耗)测量系统的测量误差。尽管如此,空载损耗测量系统的测量误差也应控制在某一范围内,并且要尽量减小这一误差,因为该误差对判定产品是否合格关系重大。

空载损耗(负载损耗)测量系统目前使用最多的仍是传统的仪表测量系统,一小部分企业与有关研究院所合作开发使用了微机自动测量系统。

1 仪表测量系统误差计算

仪表测量系统由高压电流互感器、电压互感器、瓦特表、有效值电压表、平均值电压表和电流表等组成。仪表测量系统的测量误差由上述测量仪器、仪表的测量误差所决定。间接测量空载损耗的测量误差可根据空载损耗与其他各直接被测量之间的函数关系及各直接被测量的测量误差来计算。

1.1 建立空载损耗计算的函数关系

由第六章空载试验的论述可知,变压器的空载损耗与空载试验时施加的电压波形、频率、电压值和电压,电流互感器的电压比、电流比及相位差等有关。另外,空载损耗的测量方法有两瓦特表法和三瓦特表法。本章以两瓦特表法为例,其与三瓦特表法不同的只是误差分析时多了一个瓦特表的误差。

根据理论分析,实测空载损耗 P_0 可用下式计算:

$$P_0 = K_{PT} \cdot K_{CT} \cdot (P_{01} \pm P_{02}) \cdot (1+d) \cdot \left(\frac{U_r}{U}\right)^2 \cdot K_f^{1.5} \cdot K_s \quad (29-17)$$

当平均值电压表读数 U' 与有效值电压表读数 U 近似相等时,试验电压波形满足要求,此时电压波形校正系数 $d = (U' - U)/U' \approx 0$ 。由于试验时实加电压 $U = K_{PT} \cdot V$,故式(29-17)可变为:

$$P_0 = K_{CT} \cdot (P_{01} \pm P_{02}) \cdot \frac{U_r^2}{K_{PT} \cdot V^2} \cdot K_f^{1.5} \cdot K_s \quad (29-18)$$

式中 K_{CT} ——电流互感器的电流比;

K_{PT} ——电压互感器的电压比;

P_{01}, P_{02} ——两瓦特表的测量损耗, kW;
 U_r ——变压器的额定电压, V;
 V ——电压互感器低压侧测量电压, V;
 $K_f^{1.5}$ ——频率校正系数;
 K_δ ——电压、电流互感器相位差校正系数。

1.2 推导 P_0 相对误差的计算公式

将式(29-18)两边取对数, 再微分, 并经推导可得 P_0 的相对误差 δ_{P_0} 的计算公式(负误差均取绝对值):

$$\delta_{P_0} = \pm(\delta_{K_{CT}} + \delta_{P_{01}} + |\delta_{P_{02}}| + |\delta_{K_{VT}}| + 2|\delta_V| + 1.5\delta_{K_f} + \delta_{K_\delta}) \quad (29-19)$$

式中 $\delta_{K_{CT}}$ ——电流互感器电流比引起的相对误差, %;

$\delta_{P_{01}}$ ——瓦特表(1)测量损耗的相对误差, %;

$\delta_{P_{02}}$ ——瓦特表(2)测量损耗的相对误差, %;

$\delta_{K_{VT}}$ ——电压互感器电压比引起的相对误差, %;

δ_V ——低压测量电压的相对误差, %;

δ_{K_f} ——测量频率的相对误差, %;

δ_{K_δ} ——电流、电压互感器相位差引起的相对误差, %。

根据第六章空载试验第三节 5.2 项的推导可知:

$$\delta_{K_\delta} = 0.029 \cdot 1 \cdot \delta \cdot \tan \varphi (\%) \quad (29-20)$$

式中 δ ——电流、电压互感器的合成相位差, ';

φ ——被试产品的功率因数角, °。

1.3 空载损耗的测量误差计算

今以 S9-800/10 和 S9-1600/10 配电变压器空载损耗测量为例计算实测空载损耗的最大测量误差。

1.3.1 仪器仪表测量范围及测量误差

S9-800/10 配电变压器空载损耗 P_0 测量用仪器仪表测量范围及测量误差见表 29-4。

S9-1 600/10 配电变压器空载损耗 P_0 测量用仪器仪表测量范围及测量误差见表 29-5。

1.3.2 测量用电流电压互感器相位差和产品 S9-800/10、S9-1 600/10 空载试验时功率因数引起的空载损耗测量误差计算

由式(29-20)可知, 测量互感器的相位差和被试产品的功率因数角将产生一定的测量误差。根

表 29-4 空载测量误差(S9-800/10)

仪器仪表名称	量程	准确度	实测范围	测量误差
电压互感器	500/100V	0.05	80%	$\pm 0.05\%$ (比差) 2分(相位差)
电流互感器	25/5A	0.1	20%	$\pm 0.2\%$ (比差) 8分(相位差)
瓦特表	150W	0.5	72W(P_{01}) 20W(P_{02})	$\pm 1.04\%$ $\pm 3.75\%$
电压表	150V	0.2	80V	$\pm 0.38\%$
频率表		0.05		$\pm 0.05\%$

表 29-5 空载测量误差(S9-1 600/10)

仪器仪表名称	量程	准确度	实测范围	测量误差
电压互感器	500/100V	0.05	85%	$\pm 0.05\%$ (比差) 2分(相位差)
电流互感器	20/5A	0.1	45%	$\pm 0.2\%$ (比差) 8分(相位差)
瓦特表	300W	0.5	166W(P_{01}) 60W(P_{02})	$\pm 0.9\%$ $\pm 2.5\%$
电压表	150V	0.2	80V	$\pm 0.38\%$
频率表		0.05		$\pm 0.05\%$

据表 29-4、表 29-5 测量互感器的相位差和 S9-800/10、S9-1 600/10 变压器空载试验时的功率因数角（部分产品的参考功率因数角见表 29-6），利用式（29-20）可计算出上述两种因素产生的两种产品的测量误差，分别为 $\pm 0.693\%$ 和 $\pm 0.792\%$ 。

即 S9-800/10 变压器：

$$\delta_{k_6} = \pm 0.029 \times 1 \times 10 \times \tan 67.232^\circ \% = \pm 0.693\%$$

S9-1 600/10 变压器：

$$\delta_{k_6} = \pm 0.029 \times 1 \times 10 \times \tan 69.818^\circ \% = \pm 0.792\%$$

1.3.3 空载损耗的测量误差计算

根据本节 1.3 中（1）~（2）项的计算结果，利用式（29-19）可计算出两种产品空载损耗的测量误差。S9-800/10 变压器空载损耗测量值的最大误差为 $\pm 6.568\%$ ，S9-1 600/10 变压器空载损耗测量值的最大误差为 $\pm 5.277\%$ 。

即 S9-800/10 变压器：

$$\delta_{p_0} = \pm (0.2 + 1.04 + 3.75 + 0.05 + 2 \times 0.38 + 1.5 \times 0.05 + 0.693) \% = \pm 6.568\%$$

S9-1 600/10 变压器：

$$\delta_{p_0} = \pm (0.2 + 0.9 + 2.5 + 0.05 + 2 \times 0.38 + 1.5 \times 0.05 + 0.792) \% = \pm 5.277\%$$

2 自动测量系统误差计算

现以上海电动工具研究所研制的 9401 型变压器损耗自动测量系统配本节 1 项中仪表测量系统所用的高压电流、电压互感器（0.05 级 PT、0.1 级 CT）为例。该系统由高压电流、电压互感器，精密电流、电压互感器和瞬态记录仪（功率分析仪）等组成。其测量误差将由互感器的比差、相位差和产品功率因数角造成的误差及瞬态记录仪的误差所组成。

2.1 空载损耗测量误差的计算公式

空载损耗测量误差 δ 可用下式计算：

$$\delta = \pm (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) \quad (29-21)$$

式中 δ_1 ——高压测量互感器的合成误差；

$$\delta_1 = \delta_{PT} + \delta_{CT} + 0.029 \times 1 (\text{PT 相位差} + \text{CT 相位差}) \cdot \tan \varphi, \% ; \quad (29-22)$$

δ_2 ——精密测量互感器的合成误差；

$$\delta_2 = \delta_{PT} + \delta_{CT} + 0.029 \times 1 (\text{PT 相位差} + \text{CT 相位差}) \cdot \tan \varphi, \% ; \quad (29-23)$$

δ_3 ——瞬态记录仪的合成误差；

$$\delta_3 = \delta_v + \delta_i + 0.029 \times 1 (\text{记录仪电压通道相位差} + \text{记录仪电流通道相位差}) \cdot \tan \varphi, \% ; \quad (29-24)$$

δ_v ——记录仪电压通道幅值误差，%；

δ_i ——记录仪电流通道幅值误差，%。

2.2 空载损耗的测量误差计算

2.2.1 9401 型系统的仪器测量误差

9401 型系统的仪器测量误差见表 29-7。

表 29-6 部分产品的功率因数角

产品型号	空载试验		负载试验	
	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0 / ^\circ$	$\cos \varphi_K$	$\varphi_K / ^\circ$
S9-500/10	0.436	64.151	0.261	74.871
S9-800/10	0.387	67.232	0.273	74.157
S9-1250/10	0.369	68.346	0.207	78.053
S9-1600/10	0.345	69.818	0.185	79.339
SC-800/10	0.317	71.518	0.128	82.646
SC-1000/10	0.296	72.782	0.107	83.858
SC-1250/10	0.279	73.799	0.104	84.030
SFZ8-40000/110	0.295	72.842	0.049	87.191
SFZ8-50000/110	0.274	74.098	0.048	87.249
SFP9-360000/220	0.284	73.501	0.016	89.083
ODFP-120000/500	0.244	75.877	0.04	87.708
DFP-210000/500	0.167	80.387	0.015	89.141

2.2.2 空载损耗的测量误差计算

根据表 29-4、表 29-5 中互感器的测量误差和相位差,表 29-6 中产品的功率因数角,表 29-7 中测量仪器的测量误差和相位差,利用式(29-21)~式(29-24)可计算出两种产品空载损耗的测量误差。S9-800/10 变压器空载损耗的最大误差为 $\pm 1.03\%$;S9-1 600/10 变压器空载损耗的最大误差为 $\pm 1.136\%$ 。

即 S9-800/10 变压器:

$$\delta_1 = \pm(0.05 + 0.2 + 0.029 \times 1 \times 10 \times \tan 67.232^\circ)\% = \pm 0.943\%$$

$$\delta_2 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.6 \times \tan 67.232^\circ)\% = \pm 0.062\%$$

$$\delta_3 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.076 \times \tan 67.232^\circ)\% = \pm 0.025\%$$

$$\delta = \pm(0.943 + 0.062 + 0.025)\% = \pm 1.03\%$$

S9-1600/10 变压器:

$$\delta_1 = \pm(0.05 + 0.2 + 0.029 \times 1 \times 10 \times \tan 69.818^\circ)\% = \pm 1.042\%$$

$$\delta_2 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.6 \times \tan 69.818^\circ)\% = \pm 0.068\%$$

$$\delta_3 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.076 \times \tan 69.818^\circ)\% = \pm 0.026\%$$

$$\delta = \pm(1.042 + 0.068 + 0.026)\% = \pm 1.136\%$$

3 几点分析

(1)由以上计算结果可知,自动测量系统产生的测量误差远小于仪表测量系统产生的测量误差。原因主要是自动测量系统采用的精密测量互感器和瞬态记录仪产生的误差远小于仪表测量系统采用的瓦特表和电压表等产生的误差。

(2)对于仪表测量系统,当测量互感器采用 0.1 级及以上时,测量误差主要决定于瓦特表的准确度、测量范围(测量范围越接近满足量程测量误差越小)和功率因数(应用低功率因数瓦特表)。当瓦特表的准确度一定,功率因数又与被试产品的功率因数相当时,测量范围越大,产生的测量误差越小。S9-800/10 空载损耗测量误差大于 S9-1600/10 空载损耗测量误差主要原因亦在于此。

(3)由于仪表测量系统的测量误差已达 $\pm 5\% \sim \pm 7\%$,所以对于仪表测量系统除应尽量提高测量仪器仪表的准确度外,还应选择适当的量程以扩大测量范围。

(4)以上分析计算的测量误差是测量结果可能产生的最大误差,实际产生的测量误差(对同一套测量系统和相同的测量范围)均小于上述计算值。

第五节 负载损耗测量系统的误差计算

1 仪表测量系统误差计算

测量系统的组成基本上同空载损耗测量系统。

1.1 建立负载损耗计算的函数关系

由第七章负载试验的论述可知,变压器负载试验时的波形为近似标准正弦波形,所以变压器的负载损耗仅与试验时施加的电流和电压、电流互感器的电压比、电流比及相位差等有关。另外,测量及计算均以两瓦特表为例。

根据理论分析,实测负载损耗 P_k 可用下式计算:

$$P_k = K_{PT} \cdot K_{CT} \cdot (P_{k1} \pm P_{k2}) \cdot \left(\frac{I_r}{I}\right)^2 \cdot K_\delta \quad (29-25)$$

表 29-7 9401 系统仪器测量误差

仪器名称		幅值		
		准确度	测量误差	相位差
精密测量	PT	0.01 级	$\pm 0.01\%$	0.3'
互感器	CT	0.01 级	$\pm 0.01\%$	0.3'
瞬态	电压通道	0.01 级	$\pm 0.01\%$	0.38'
记录仪	电流通道	0.01 级	$\pm 0.01\%$	0.38'

$$\text{即: } P_k = K_{PT} \cdot (P_{K1} \pm P_{K2}) \cdot \frac{I_r^2}{K_{CT} \cdot I_2^2} \cdot K_8 \quad (29-26)$$

式中 K_{PT} ——电压互感器的电压比;
 P_{K1} 、 P_{K2} ——两瓦特表的测量损耗, kW;
 K_{CT} ——电流互感器的电流比;
 I_r ——变压器的额定电流, A;
 I_2 ——电流互感器低压侧测量电流, A;
 K_8 ——电压、电流互感器相位差校正系数。

1.2 推导 P_k 相对误差 δ_{PK} 的计算公式

利用 δ_{P_0} 计算公式的推导原理和方法, 并对负误差取绝对值, 可得 δ_{PK} 的计算公式:

$$\delta_{PK} = \pm (\delta_{KPT} + \delta_{PK1} + |\delta_{PK2}| + |\delta_{KCT}| + 2|\delta_{I_2}| + \delta_{K_8}) \quad (29-27)$$

式中 δ_{KPT} ——电压互感器电压比引起的相对误差, %;
 δ_{PK1} ——瓦特表(1)测量损耗的相对误差, %;
 δ_{PK2} ——瓦特表(2)测量损耗的相对误差, %;
 δ_{KCT} ——电流互感器电流比引起的相对误差, %;
 δ_{I_2} ——低压测量电流的相对误差, %;
 δ_{K_8} ——电压、电流互感器相位差引起的相对误差, %。

1.3 负载损耗测量误差计算

1.3.1 仪器仪表测量范围及测量误差

S9-800/10 配电变压器负载损耗 P_k 测量用仪器仪表测量范围及测量误差见表 29-8。

S9-1600/10 配电变压器负载损耗 P_k 测量用仪器仪表测量范围及测量误差见表 29-9。

1.3.2 测量用电流电压互感器相位差和产品 S9-800/10、S9-1600/10 负载试验时功率因数引起的负载损耗测量误差

根据表 29-8、表 29-9 中的测量互感器的相位差和表 29-6 中 S9-800/10、S9-1600/10 变压器负载试验时的功率因数角 (φ_k), 利用式(29-20)可计算出测量互感器相位差和产品功率因数产生的两种产品的测量误差, 分别为 $\pm 1.025\%$ 和 $\pm 1.546\%$ 。

即 S9-800/10 变压器:

$$\begin{aligned} \delta_{K_8} &= \pm (0.0291 \times 10 \times \tan 74.157^\circ) \% \\ &= \pm 1.025\% \end{aligned}$$

S9-1600/10 变压器:

$$\delta_{K_8} = \pm (0.0291 \times 10 \times \tan 79.339^\circ) \% = \pm 1.546\%$$

表 29-8 负载测量误差 (S9-800/10)

仪器仪表名称	量程	准确度	实测范围	测量误差
电压互感器	500/100V	0.05	88%	$\pm 0.05\%$ (比差) 2 分 (相位差)
电流互感器	100/5A	0.1	46%	$\pm 0.2\%$ (比差) 8 分 (相位差)
瓦特表	150W	0.5	131W(P_{01}) 60W(P_{02})	$\pm 0.57\%$ $\pm 1.25\%$
电流表	5A	0.5	2.31A	$\pm 1.08\%$

表 29-9 负载测量误差 (S9-1600/10)

仪器仪表名称	量程	准确度	实测范围	测量误差
电压互感器	500/100V	0.05	86%	$\pm 0.05\%$ (比差) 2 分 (相位差)
电流互感器	100/5A	0.1	91%	$\pm 0.2\%$ (比差) 8 分 (相位差)
瓦特表	300W	0.5	242W(P_{01}) 117W(P_{02})	$\pm 0.62\%$ $\pm 1.28\%$
电流表	5A	0.5	4.55A	$\pm 0.55\%$

1.3.3 负载损耗的测量误差计算

根据本节 1.3(1)和(2)项的计算结果,利用式(29-27)可计算出两种产品负载损耗的最大测量误差。S9-800/10 变压器负载损耗的最大误差为 $\pm 5.255\%$;S9-1600/10 变压器负载损耗的最大误差为 $\pm 4.796\%$ 。

即 S9-800/10 变压器:

$$\delta_{PK} = \pm(0.05 + 0.57 + 1.25 + 0.2 + 2 \times 1.08 + 1.025)\% = \pm 5.255\%$$

S9-1600/10 变压器:

$$\delta_{PK} = \pm(0.05 + 0.62 + 1.28 + 0.2 + 2 \times 0.55 + 1.546)\% = \pm 4.796\%$$

2 自动测量系统误差计算

仍以上海电动工具研究所研制的 9401 型变压器损耗自动测量系统配上述仪表测量系统所用的高压测量互感器为例。

2.1 负载损耗测量误差的计算公式

负载损耗测量误差的计算公式同式(29-21)~式(29-24)。

2.2 负载损耗测量误差的计算

根据表 29-6 中 S9-800/10、S9-1600/10 变压器负载试验时的功率因数角(φ_K),表 29-8、表 29-9 中测量互感器的测量误差和相位差,表 29-7 中测量仪器的测量误差和相位差,利用式(29-21)~式(29-24)可计算出两种产品负载损耗的最大测量误差。S9-800/10 变压器负载损耗的最大误差为 $\pm 1.385\%$;S9-1600/10 变压器负载损耗的最大误差为 $\pm 1.941\%$ 。

即 S9-800/10 变压器:

$$\delta_1 = \pm(0.05 + 0.2 + 0.029 \times 1 \times 10 \times \tan 74.157^\circ)\% = \pm 1.275\%$$

$$\delta_2 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.6 \times \tan 74.157^\circ)\% = \pm 0.082\%$$

$$\delta_3 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.076 \times \tan 74.157^\circ)\% = \pm 0.028\%$$

$$\delta = \pm(1.275 + 0.082 + 0.028)\% = \pm 1.385\%$$

S9-1600/10 变压器:

$$\delta_1 = \pm(0.05 + 0.2 + 0.029 \times 1 \times 10 \times \tan 79.339^\circ)\% = \pm 1.796\%$$

$$\delta_2 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.6 \times \tan 79.339^\circ)\% = \pm 0.113\%$$

$$\delta_3 = \pm(0.01 + 0.01 + 0.029 \times 1 \times 0.076 \times \tan 79.339^\circ)\% = \pm 0.032\%$$

$$\delta = \pm(1.796 + 0.113 + 0.032)\% = \pm 1.941\%$$

3 几点分析

(1)空载损耗测量系统第四节 3 中(1)~(4)项的分析同样适用于负载损耗测量系统。

(2)对于本章分析的仪表测量系统,其负载损耗的最大测量误差已达到 $\pm 5\%$ 左右,因此,也应采取第四节 3 中(3)项提出的办法来尽量减小负载损耗的测量误差。另外,对于大型变压器的负载试验,由于产品的功率因数非常小(见表 29-6),所以,负载试验时应该采用功率因数更小(约为零)的功率转换表(分析仪)代替现行的瓦特表,且必要时测量互感器也应采用零磁通电流互感器或双级式电流互感器(比值差和相位差更小)。

第六节 测量不确定度

1 测量不确定度的分类

1.1 标准不确定度

用标准偏差表示的测量结果的不确定度称为标准不确定度。标准不确定度又分为两类:A 类标

准不确定度,即能用统计方法计算的标准不确定度;B类标准不确定度,即不同于A类的其他方法计算的标准不确定度。

1.2 合成标准不确定度

合成标准不确定度等于各分量(加权)标准不确定度方差之和(相关时还应加上相关项各分量和)的正平方根。

1.3 扩展不确定度

扩展不确定度又称为展伸不确定度。扩展不确定度等于合成标准不确定度乘以包含因子。

2 测量不确定度的可能来源

- (1)被测量的定义不完整;
- (2)被测样品不能完全代表定义的被测量;
- (3)模拟仪表读数有人为偏移;
- (4)仪器分辨力或鉴别阈值的影响;
- (5)测量方法和测量过程中引入的近似值及假设的影响;
- (6)相同条件下被测量重复观测值中的变化;
- (7)环境条件对测量过程的影响,或环境条件测量的不完善的影响;
- (8)数据简化计算中使用的常数及其他参数值的影响。

3 测量不确定度的计算(评定)

3.1 标准不确定度

3.1.1 A类标准不确定度

对于一组 x_i 测量,当测量次数为 n 时,则 x_i 的算术平均值 \bar{x} 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

\bar{x} 的 A 类标准不确定度 $u(\bar{x})$ 为:

$$u(\bar{x}) = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (29-28)$$

对于 m 组 x_{ji} 测量,每组测量次数仍为 n 时,则 x_{ji} 的总算术平均值 \bar{X} 为:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ji}$$

\bar{X} 的 A 类标准不确定度 $u(\bar{X})$ 为:

$$u(\bar{X}) = \frac{s(x_{ji})}{N} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{X})^2}{N(N-m)}} \quad (29-29)$$

式中 $N = \sum_{j=1}^m n_j$

3.1.2 B类标准不确定度

当已知扩展不确定度 $U(x_i)$ 和对应分布及包含因子 $K_p(K)$ 时, B 类标准不确定度 $u(x_i)$ 为:

$$u(x_i) = \frac{U(x_i)}{K_p(K)} \quad (29-30)$$

式中 K_p ——测量仪表的示值分布为正态分布、均匀分布或其他已知分布、概率 P 为已知时的包

含因子(见表 29-10、表 29-11);

K ——测量仪表的示值分布未知或为近似正态分布,无法确定概率 P 时的包含因子。

当未知扩展不确定度,但已知或可估计出 x_i 的变化半范围 a 和对应分布及包含因子 $K_p(K)$ 时, B 类标准不确定度 $u(x_i)$ 为:

$$u(x_i) = \frac{a}{K_p(K)} \quad (29-31)$$

对于 B 类标准不确定度评定中 a 的计算及分布的判定,详见 JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》技术规范。

3.1.3 标准不确定度的自由度

自由度用来衡量不确定度的可靠程度,不论是 A 类评定,还是 B 类评定,自由度越大,表明不确定度的可靠程度越高。

对于 A 类评定,自由度 $\gamma = n - 1$ 。

对于 B 类评定,自由度 $\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} \doteq \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\sigma u(x_i)}{u(x_i)} \right]^2 \doteq \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^2$ 。 $\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)}$ 为标准不确定度 $u(x_i)$ 的相对标准不确定度,其值取决于标准不确定度的可靠程度或可信程度。如可信程度为 80%(不可信程度为 20%),则 $\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} = 0.2$ 。如果计算结果为小数,可取整数。

3.1.4 标准不确定度的评定程序

A 类标准不确定度的评定程序见图 29-2。

B 类标准不确定度的评定程序见图 29-3。

表 29-10 正态分布条件下 P 与 K_p 的关系

$P/\%$	50	68.27	90	95	95.45	99	99.73
K_p	0.67	1	1.64	1.96	2	2.58	3

表 29-11 其他已知分布 P 与 K_p 的关系

分布类型	均匀分布	三角分布	梯形分布	反正弦分布	两点分布
$P/\%$	95	99	100	100	100
K_p	1.65	1.71	$\sqrt{3}$	$\sqrt{6}$	2

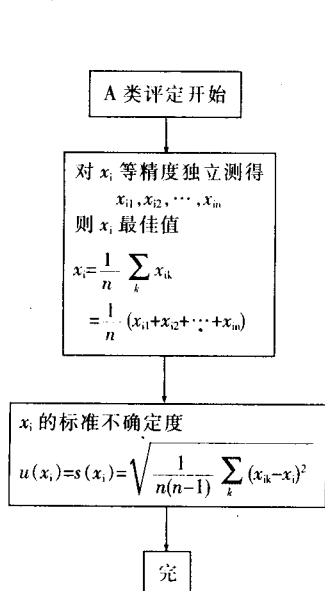


图 29-2 标准不确定度的 A 类评定

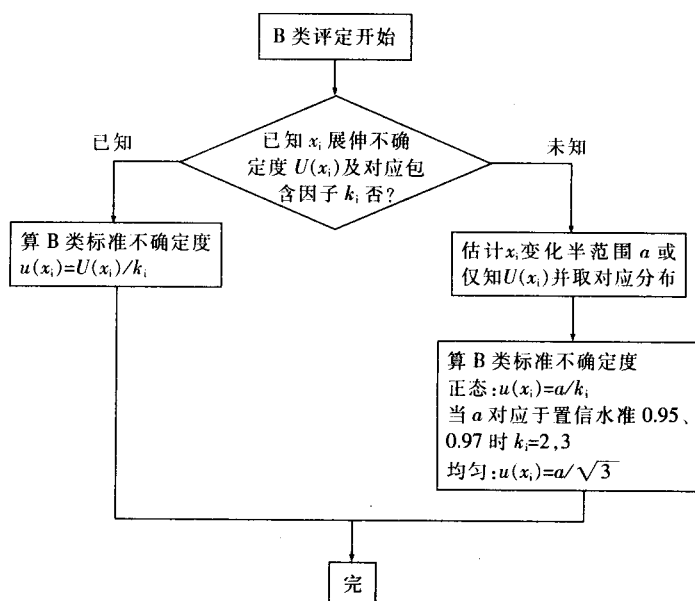


图 29-3 标准不确定度的 B 类评定

3.2 合成标准不确定度

要计算合成标准不确定度,首先应判定各分量是否相关;另外应分别求出 x_i, x_j 的不确定度传播系数,即 $C_i = \frac{\alpha f}{\alpha x_i}, C_j = \frac{\alpha f}{\alpha x_j}$,并计算分量标准不确定度 $u_i = \left| \frac{\alpha f}{\alpha x_i} \right| \cdot u(x_i), u_j = \left| \frac{\alpha f}{\alpha x_j} \right| \cdot u(x_j)$,然后采用不同的公式计算合成标准不确定度 $u(y)$ 。

3.2.1 各分量不相关时,合成标准不确定度为

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [C_i u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (29-32)$$

如果函数 f 形式为 $y = x_1^{P_1} \cdot x_2^{P_2} \cdots x_N^{P_N}$ 时,可用对数微分的方法计算相对合成标准不确定度,

$$\left[\frac{u(y)}{y} \right]^2 = \left[\frac{P_1 u(x_1)}{x_1} \right]^2 + \left[\frac{P_2 u(x_2)}{x_2} \right]^2 + \cdots + \left[\frac{P_N u(x_N)}{x_N} \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_i u(x_i)}{x_i} \right]^2 \quad \text{即:}$$

$$u(y)\% = \sqrt{\sum_{i=1}^N [P_i u(x_i)\%]^2} \quad (29-33)$$

式中 P_i ——不确定度传播系数,计算方法同 C_i 。

3.2.2 当分量相关时,合成标准不确定度为

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [C_i u(x_i)]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N C_i C_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \quad (29-34)$$

式中 r ——分量相关系数。

相关系数 r 是各变量之间相互依赖性的度量,当 $r=0$ 时各分量不相关; $r=1$ 时各分量完全正相关; $r=-1$ 时各分量完全负相关。

为了表达方便和便于区别,可用 y_i 代替式(29-34)中 $r(x_i, x_j)$ 中的 x_j ,此时 $r(x_i, y_i) = r(x_i, x_j)$ 。

$r(x_i, y_i)$ 可用下式计算:

$$r(x_i, y_i) = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (29-35)$$

一般情况下,用统计法(上述公式)计算相关系数是困难的,实际应用时可按以下原则考虑相关系数:若判断 x, y 弱相关,可近似取 $r=0$;若判断 x, y 强相关,可近似取 $r=1$ 或 $r=-1$ 。

3.2.3 如何才能使各分量不相关

由 3.2.1 和 3.2.2 项分析可知,各分量不相关时 $u(y)$ 计算大为简单,相关时 $u(y)$ 计算要复杂得多。因此对于相关分量,测量时应尽量采取一定的措施,使其不相关。

(1) 如果重复测量值 3.2、3.2、3.2、……尽管只代表一个值,但其重复测量是不独立的,即是相关的,原因主要是仪器分辨力仅为 0.1。若改用分辨力为 0.01 的仪器,则可测出 3.24、3.28、3.17、……,此值可认为不相关。

(2) 若(1)中各测量值都存在一个固定的系统误差,则它们之间存在一定程度的相关。若将固定的系统误差扣除,则它们之间就可能不相关了。

(3) 若多次测量采用同一个调零的仪器,则各测量值之间就有一定的相关。若每次测量前均将仪器重新调零,则各测量值之间就可能不相关了。

(4) 每次读数后给仪表一个干扰,则可使各读数之间不相关。

(5)扣除较长时间间隔测量中的漂移,可使各读数之间不相关。

(6)试验室中使用不同的恒源器接至各个仪器隔断公共值对不同仪器的影响,可使各测量值之间不相关。

3.2.4 合成标准不确定度的自由度

合成标准不确定度的自由度称为有效自由度,可用韦尔奇·萨特思韦特(Welch·Satterthwaite)公式计算(各分量相关时不适用):

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\nu_i}} \quad (29-36)$$

式中 u_i ——各分量标准不确定度;

$$u_i = C_i \cdot u(x_i)$$

ν_i ——各分量标准不确定度的自由度。

3.2.5 合成标准不确定度的评定程序

合成标准不确定度的评定程序见图 29-4。

3.3 扩展(展伸)不确定度

3.3.1 扩展(展伸)不确定度的计算

扩展(展伸)不确定度 U 等于合成标准不确定度 $u(y)$ 乘以包含因子 $K_p(K)$ 。即:

$$U = K_p(K) \cdot u(y) \quad (29-37)$$

当 y 的分布为正态分布时,则可根据合成标准不确定度 $u(y)$ 的有效自由度 ν_{eff} 和给定的概率 P (一般选 95% 和 99%) 查 t 分布的临界值 $t_p(\nu_{\text{eff}})$, $t_p(\nu_{\text{eff}})$ 即可作为包含因子 K_{p0} 。当 ν_{eff} 足够大时可取 $\nu_{\text{eff}} = \infty$, 此时 $K_{p(95\%)}$ 可取等于 2; $K_{p(99\%)}$ 可取等于 3。

当 y 的分布为其他已知分布时,则可根据给定的概率 P (一般取 100%) 选取相应的 K_p (见 3.1 项)。

当 y 的分布为未知分布时,则可选择 K 为 2~3, 大多数情况下选取 K 等于 2。用这种方法计算的扩展(展伸)不确定度只能评价为在 $y-U$ 至 $y+U$ 区间内包含了测量结果可能值的大部分,而不能说明包含概率 P 的值为百分之多少。

3.3.2 扩展(展伸)不确定度的评定程序

扩展(展伸)不确定度的评定程序见图 29-5。

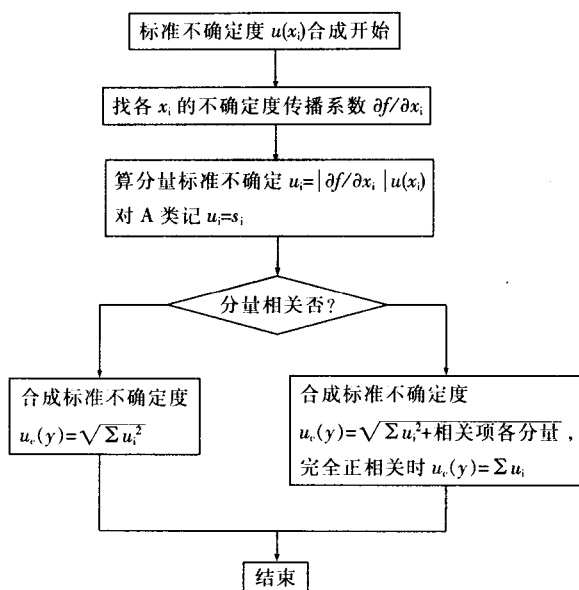


图 29-4 合成标准不确定度计算

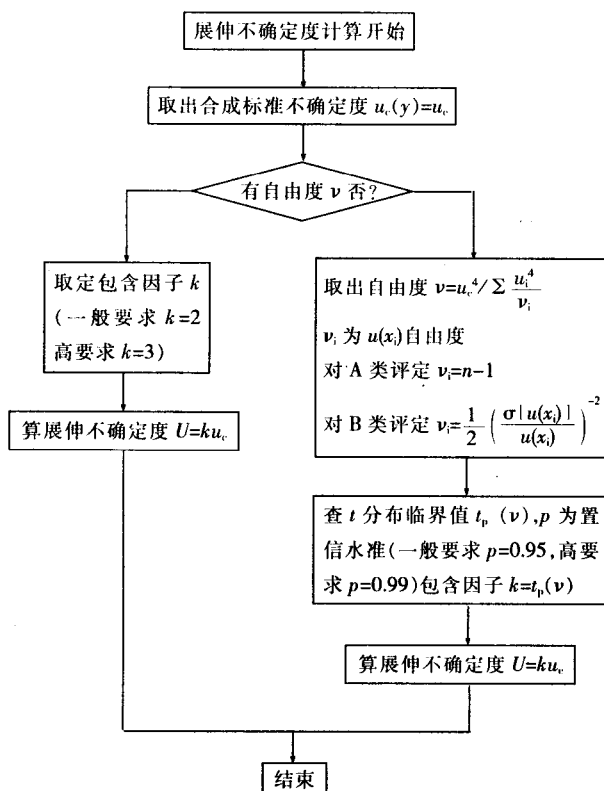


图 29-5 展伸不确定度计算

4 测量不确定度的应用与表示

4.1 测量不确定度的应用

按照 JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》标准要求,对于校准证书上的校准结果或修正值应给出测量不确定度;对于比较重要的测量,如计量器具新产品生产定型鉴定中的测量等,应给出测量不确定度。

按照 GB/T15481-2000 (等同 ISO/IEC17025:1999)《检测和校准实验室能力的通用要求》标准要求,当不确定度与检测结果的有效性或应用有关,或客户的指令中有要求,或当不确定度影响到对规范限度的符合性时,检测报告应给出测量不确定度。

对于测量不确定度的应用范围一般按下述原则,对于基础计量学研究、基本物理常量测量、复现国际单位制的国际比对,使用合成标准不确定度;除上述及某些特殊要求外,一般皆使用扩展不确定度。

4.2 测量不确定度的表示

4.2.1 使用合成标准不确定度

使用合成标准不确定度时应包括 JJF1059-1999 标准要求和信息,同时还应明确说明被测量 y 的定义;给出被测量 y 的估计值、合成标准不确定度 $u(y)$ 及其单位、有效自由度 ν_{eff} ;必要时可给出相对标准不确定度。

不确定度的表示有四种形式(详见 JJF1059-1999 标准),例如,当标准砝码的质量为 m_s ,测量结果为 100.021 47g,合成标准不确定度 $u(m_s)$ 为 0.35mg 时,不确定度的表示形式为:

- (1) $m_s=100.021\ 47\text{g}$;合成标准不确定度 $u(m_s)=0.35\text{mg}$ 。
- (2) $m_s=100.021\ 47(35)\text{g}$;括号内的数是按标准差给出,其末位与前面结果内末位数对齐。
- (3) $m_s=100.021\ 47(35)\text{g}$;括号内按标准差给出,与前面结果有相同计量单位。
- (4) $m_s=(100.021\ 47\pm 0.000\ 35)\text{g}$;正负号后之值按标准差给出,并非置信区间。

以上第②种形式一般用于公布常数、常量;第(4)种形式因习惯上用于高置信概率的区间,一般应避免使用。

4.2.2 使用扩展不确定度

除合成标准不确定度要求的内容和信息外,对扩展不确定度 $U(U_p)$ 还应给出 K 值和 P 值。

扩展不确定度的表示形式,对于 $U=Ku(y)$ 有两种形式:

- (1) $m_s=100.021\ 47, U=0.70\text{mg}; K=2$ 。
- (2) $m_s=(100.021\ 47\pm 0.000\ 70)\text{g}; K=2$ 。

对于 $U_p=K_p\cdot u(y)$ 有四种形式:

- (1) $m_s=100.021\ 47\text{g}, U_{95}=0.79\text{mg}, \nu_{\text{eff}}=9$ 。
- (2) $m_s=(100.021\ 47\pm 0.000\ 79)\text{g}; \nu_{\text{eff}}=9$,括号内第二项为 U_{95} 之值。
- (3) $m_s=100.021\ 47(79)\text{g}, \nu_{\text{eff}}=9$,括号内为 U_{95} 之值,其末位与前面结果内末位数对齐。
- (4) $m_s=100.021\ 47(0.000\ 79)\text{g}; \nu_{\text{eff}}=9$,括号内为 U_{95} 之值,与前面结果有相同计量单位。

当扩展不确定度以 U_p 给出时,为了明确起见,最好采用如下的文字说明,如:

$m_s=(100.021\ 47\pm 0.000\ 79)\text{g}$,式中正负号后的值为扩展不确定度 $U_{95}=K_{95}\cdot u$,合成标准不确定度 $u(m_s)=0.35\text{mg}$,自由度 $\nu_{\text{eff}}=9$,包含因子 $K_p=t_{95}(9)=2.26$,从而具有约为 95% 概率的置信区间。

第三十章 变压器油色谱分析检测和故障的判断

第一节 概 述

变压器绝缘油的色谱分析技术, 早已被成功地作为运行部门对运行中变压器进行监测的一种手段。实践证明: 此项技术在发现变压器的潜伏性故障较为灵敏且有效, 对保证变压器的可靠运行起了较重要的作用。当前, 此项技术又普及到了变压器制造厂, 使变压器的制造隐患消除在制造厂中, 从而为使出厂的变压器不带隐患地投入到电网运行提供了初始条件。

通过对变压器的共同实践, 使运行部门和制造厂对此项技术取得了共识, 从而在 1987 年颁发了国标 GB7252—1987《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(以下简称《导则》), 使运行部门和制造厂在判断变压器的故障时有了共同的准则。

对绝缘油色谱分析技术中的油样采样部位、保存、运输和分析方法等的具体操作要求, 检测的周期和判断的具体规定等都较为详细的列在国标《导则》中, 本附录不再赘述。而对变压器油中溶解气体的来源, 变压器内部故障的类型和油中所含气体的特征, 变压器内部故障的判断方法等都将在本附录中作进一步阐述。

此外, 在本附录中用了较大的篇幅列举了变压器在运行中出现的各种故障实例。一方面是为了加深对《导则》的理解和正确贯彻, 另方面则是通过对各种故障的故障点的查找过程, 为操作者提供了工作方法, 便于在操作中参考。

应当指出, 《导则》中所规定的检测周期和判断依据等都是长时期实践经验的总结。为了正确贯彻执行《导则》, 对分析和判断技术尚需不断的充实、提高和完善, 以便能更准确无误的判断出变压器在运行中的状况。

第二节 变压器油中溶解气体的来源

1 空气的溶解

变压器油中溶解气体的主要成分是氧气和氮气, 空气在油中溶解的饱和含量于 101.3kPa、25℃ 时为 10%(V)。油中溶解的空气为: N_2 71% 和 O_2 28%, 其他气体 1%。而在空气中 N_2 为 79%, O_2 为 20%, 其他气体为 1%。这是因为氧比氮在油中的溶解度大所致。

油中的总含气量与变压器的密封方式、油的脱气程序等因素有关。一般开放式变压器油中的溶解气体是饱和的, 总含气量约为 10%; 充氮保护的变压器油中的氮气是饱和的, 总含气量约为 6%~9%; 隔膜密封的变压器, 则根据其注油和脱气方式及油路系统的严密性而有所不同, 油中的总含气量大体在 3%~8% 范围, 状态较好时可有较小的含气量, 如为 3%。

2 变压器在正常运行中产生的气体

变压器在正常运行中, 绝缘油和固体绝缘材料由于受到电场、热、湿度和氧的作用, 随运行时间的延续而发生速度缓慢的老化过程, 除产生一些非气态的劣化产物外, 还会产生少量的氢、低分子烃类气体和碳的氧化物等, 其中碳的氧化物(CO 、 CO_2)成分最多, 其次是氢和烃类气体。这些气体大部分溶解于油中。

3 变压器在故障运行下产生的气体

当变压器在运行中,内部存在潜伏性故障时,就会加快上述气体的产生速度,随着故障的继续发展,分解出的气体将形成气泡,在油中经过对流、扩散,将不断地溶解于油中,使油中的故障气体不断积累,含量很高,甚至达到饱和状态,并析出气泡进入到气体继电器中。

4 其他原因引入的气体

绝缘油在精炼或在处理过程中将会产生相当含量的气体;变压器在制造时的干燥、组装和浸油过程中产生的气体;以及辅助设备(包括连接管路)带入的气体等。

第三节 变压器内部故障的类型及其油中气体的特征

1 油纸绝缘材料产生气体的模拟试验结果

综合国内外有关油和纸绝缘材料分解的模拟试验和实测经验的报告,大体归纳成如下几点:

(1)绝缘油在 140℃以下温度时,有蒸发汽化和缓慢的老化过程。

(2)绝缘油在 140℃到 500℃温度时,油分解主要产生烷烃类气体,其中主要是甲烷(CH_4)和乙烷(C_2H_6),随着温度的升高(如 500℃以上),油分解的速度将急剧增加,其中烯烃和氢的增加较快,且乙烯(C_2H_4)更为明显。而温度更高时(800℃左右),还会产生乙炔(C_2H_2)气体。

(3)当油中存在电弧时(温度超过 1 000℃),油发生急剧裂解产生气体,此时的气体大部分是乙炔和氢气(H_2),并有一定含量的甲烷和乙烯。

(4)变压器在运行中,由于负载变化所引起的热胀冷缩,用潜油泵循环油所引起的湍流,以及铁心的磁滞伸缩效应所引起的机械振动等,都会导致形成空穴和油释放气体并溶解于油中。

如果所产生的气泡集聚于变压器绝缘结构中的高电场区域内,则会在高电场作用下引起气隙的放电(一般称为局部放电),而局部放电本身又可进一步引起油的分解和附近固体绝缘材料的分解而产生气体,这些气体在电场作用下会更有利于放电的发展并产生气体。这种局部放电的结果使油分解的气体主要是氢和少量的甲烷。当这种局部放电转变为火花放电时,除主要产生氢气和少量的甲烷之外,还会产生较多含量的乙炔。

(5)当固体绝缘材料在较低温度(140℃以下)长时期加热时,将逐渐地变质老化并产生气体,其中主要的含量是一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO_2),且后者是主要成分。

(6)当固体绝缘材料在高于 200℃长时期作用下,除产生碳的氧化物之外,还分解有氢、烃类气体。温度不同时,一氧化碳和二氧化碳的比值亦有所不同,这一比值在低温时小而在高温时大。

(7)钢铁等材料则会对油的分解起催化作用,或参与化学反应,如水与铁反应产生氢气。此外,奥氏体不锈钢材料能储存氢,与油接触后都能释放出气体并溶解于油中。

2 故障的分类及产气特征

变压器涉及产气的内部故障一般可分为两类:即过热性和放电性。过热性故障按温度的高低,可分为低温过热、中温过热与高温过热三种类型。放电性故障则可分为局部放电、火花放电和高能量放电三种类型。另外,变压器内部进水受潮也是一种潜伏性故障。

2.1 过热性故障

所谓过热是指变压器结构中存在的局部过热点。它和变压器在正常运行中的发热是有本质区别的。例如变压器在正常运行中,结构中的温升热源是来自绕组和铁心中的负载损耗及空载损耗(还应包括一些由于漏磁形成的杂耗)。由这些损耗转化而来的热量使变压器中的绕组和铁心以及绝缘油等部位将出现正常(允许的)的温升(国标 GB1094—1996 中规定绕组温升为 65K,油温升为 55K)。显然,超过国家标准规定的部位温升就不能认为变压器是在正常状态和条件下运行了,亦即

出现了热故障状态。

过热性故障占变压器故障的比例很大,其危害性虽然不像放电性故障那样来得急迫和严重。但如果分析判断和处理不够及时和妥当,发展的后果亦会很严重(由热故障转向电故障),如绝缘材料的严重老化和热分解等。

过热性故障常会从低温过热逐步发展成为高温过热,甚至会迅速发展成为电弧性故障而造成变压器的损坏事故。因此,对过热性故障一定要认真对待,不可忽视,并应依据故障的显示情况采取相应的措施。

过热性故障发生的部位:实践表明,在变压器内部过热性故障发生的部位是载流导线系统接触不良或断股等所引起的故障较多。如分接开关接触不良;各引线焊接不好或漏焊;绕组的导线有股间短路;穿缆引线与套管导管相接触产生分流;并联引线间绝缘包扎不好而相接触,在漏磁场中产生循环电流;线段间油道过小或是统包线段引起的绝缘膨胀使油道变小或堵塞;过负载运行的额外过热等。另种故障则发生在铁心回路或磁回路中。如铁心的多点接地;铁心片间短路(包括接地片、接地隔屏、金属异物搭接铁心、铁心片间绝缘破损等);穿心螺栓与铁心相碰;漏磁通引起的油箱及结构件的局部过热等。

过热性故障所产生的气体特征:当过热点只影响到绝缘油的分解而不涉及到固体绝缘的裸金属过热故障时,产生的气体主要成分是低分子烃类,其中甲烷和乙烯是特征气体,一般这二者之和占总烃含量的80%以上。当故障点的温度较低时,甲烷所占的比例较大,随着过热点温度的升高(500℃以上),乙烯组分将急剧增加。当严重过热(800℃以上)时,也会产生少量乙炔,但其含量不超过总烃值的6%。

较高温度的过热故障涉及到固体绝缘材料时,除产生上述的低分子烃类气体外,还会产生较多含量的一氧化碳和二氧化碳。随着温度的升高,一氧化碳和二氧化碳的比值逐渐加大。对只限于线段局部油道变小或堵塞引起的过热性故障,由于过热点的温度较低,对绝缘油的热分解作用不大,因而低分子烃类气体不多。但是,由于固体绝缘材料长时期承受低温作用,会加速它的老化,甚至碳化。并且由于过热的面积较大,就会产生较多含量的一氧化碳和二氧化碳气体。

2.2 放电性故障

根据放电的能量不同,可分为高能量放电(电弧放电)、低能量放电(火花放电)和局部放电。

高能量放电故障在变压器中的任何部位都可能发生。引起高能量放电故障的原因通常是:绕组的匝间绝缘击穿;过电压引起的内部绝缘闪络;引线断裂形成的闪弧;分接开关触柱间的飞弧(如似接非接时)等等。这种故障发生时气体产生较为剧烈、产气量也大,故障气体往往来不及溶解于油中而集聚到气体继电器中并引起动作(当然随着大量气体的产生和逸出也将使油流发生涌动)。由于这种故障多是突然发生的,故障先兆常常不是很明显,监测油中溶解的气体一般不易于预诊断。此时,在出现故障后,应立即对油中气体成分进行分析,以判断故障性质和严重程度。这种故障所产生的气体的特征是总烃含量较高。其中乙炔(含量占总烃值的20%~70%)和氢占主要成分,其次是乙烯和甲烷。如果故障还涉及到固体绝缘时,瓦斯气和油中的一氧化碳及二氧化碳的含量都会比较高。

低能量放电故障是一种间歇性的放电过程。在变压器中的不同电位的导电体间、相接触的绝缘体间(在电场中由于介电系数不同)、不固定电位的悬浮体(常见的钢压钉和其钢碗间)等部位均可能发生,在电场很不均匀或畸变下也可能产生火花放电。此外,在铁心片之间、铁心接地片接触不良、分接开关操作杆金属“拨叉”的悬浮、套管均压球松动以及沿围屏纸板(长垫块支出处)表面或夹层的爬电等,都可能会发生悬浮电位的放电故障。这种放电故障产生的主要气体组分也是乙炔和氢气,其次是甲烷和乙烯,但由于故障能量较小,总烃含量一般不高。

局部放电通常是指固体绝缘材料中残存有气泡或是在导电部分上出现有某些尖角，由于其抗电强度低和电场的畸变，于是就在这些部位上发生局部放电。这种放电随着时间的持续与发展，就会引起固体绝缘材料的损坏(如出现树枝状的碳化痕迹甚至穿孔)。在局部放电时所产生的气体，其特征是氢组分最多，其次是甲烷。当放电的能量较高时，还会产生少量的乙炔。

2.3 受潮

当变压器内部进水受潮时，油中的水分和带湿气的杂质极易形成“小桥”，或者在固体绝缘材料中含有的水分加上其内部气隙的存在，将共同加速固体绝缘材料的电老化过程，并可在局部放电的作用下释放出氢气。另外，水分在电场中还会发生电解作用。而水分与铁部件相接触又会发生电化学反应，都可产生较多的氢气。

综合上述，变压器中的不同类型故障所产生气体的特征，其规律性一般可归纳如表 30-1 所示。

为了进一步的说明上述不同故障类型的产气特征，兹举出如表 30-2 所示的各种典型故障实例，供分析和判断时参考。

表 30-1 不同类型故障的产气特征

故障类型		主要组分	次要组分
过热	油	CH ₄ 、C ₂ H ₄	H ₂ 、C ₂ H ₆
	油+纸绝缘	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、CO、CO ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
电弧放电	油	H ₂ 、C ₂ H ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆
	油+纸绝缘	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO、CO ₂	CH ₄ 、C ₂ H ₄ 、C ₂ H ₆
油中电火花放电		C ₂ H ₂ 、H ₂	-
油、纸绝缘中局部放电		H ₂ 、CH ₄ 、CO	C ₂ H ₆ 、CO ₂
进水受潮或油中气泡放电		H ₂	-

表 30-2 各种故障的典型实例

序号	设备名称	油中气体含量/ $\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$								特征气体	故障情况
		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	CO	CO ₂		
1	220kV 变压器 (隔膜式)	93	211	140	724	2.4	1 077.4	238	6 630	CH ₄ 、C ₂ H ₄	分接开关接触不良，严重烧损
2	220kV 变压器 (隔膜式)	117	237	101	698	3.3	1 039.3	298	2 640	CH ₄ 、C ₂ H ₄	铁心片间短路
3	220kV 变压器 (开放式)	76	24	7	58	痕	89	793	6 218	CO	绕组绝缘膨胀，油道堵塞
4	220kV 变压器 (隔膜式)	34	37	32	39	无	108	2 412	47 200	CO、CO ₂	低压绕组绝缘膨胀、油道堵塞、绝缘炭化
5	220kV 变压器 (隔膜式)	472	274	17	204	535	1 030	547	3 382	H ₂ 、C ₂ H ₂	过电压引起低压引线对箱壳放电
6	220kV 变压器	443	85	10	103	174	372	1 002	6 512	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO	绕组支撑围屏长垫块及围屏上有严重的树枝状放电痕迹
7	66kV 电压互感器	68	47	5	54	105	211	590	99	C ₂ H ₂ 、H ₂	穿心螺栓与铁心接触不良而悬浮放电
8	220kV 电流互感器	27	5	2	7	17	31	427	1 258	C ₂ H ₄ 、H ₂	L ₁ 端子绝缘有放电烧伤痕迹
9	220kV 电容型套管	3 937	326	44	11	1	382	599	2 002	H ₂ 、CH ₄	电容心缠绕松弛；铝箔有皱褶引起局部放电，有蜡状物质
10	220kV 变压器 (隔膜式)	195	22	8	19	痕	49	610	2 430	H ₂	油中含气量高，气泡游离放电
11	66kV 变压器 (开放式)	405	44	12	33	0	89	210	2 760	H ₂	变压器箱底积水，放出约 10kg

第四节 变压器内部故障的具体判断和分析

通过绝缘油中溶解的气体分析,确认变压器有故障时,则应进一步判断故障性质、类型、严重程度和发展趋势,最后是制定相应的防范(如跟踪分析)和处理措施。可分如下几点进行叙述。

1 要查特征气体含量的分析数据是否符合“注意值”要求

由于《导则》中规定的分析判断依据是实践经验的总结。因此:

第一,对《导则》中规定的“注意值”理解要正确。《导则》中所推荐的“注意值”是根据大量运行中变压器的油色谱分析数据,通过统计分析而得出来的,在反映变压器故障的概率上有其可能性,但不是判断变压器是否存在故障的唯一标准。例如有的变压器因某些原因(如结构上特点、运行的年限、所带负载的大小和密封状况等)常会使气体含量超过“注意值”,但经反复检测证明却无故障;而有的变压器气体含量虽低于“注意值”,但其气体含量增长迅速,也应引起足够注意。因此,“注意值”的作用就在于给出“引起注意”的信号,便于对有问题的变压器开展全面的综合分析,以正确判断出有否故障和故障的严重程度。

第二,为求取准确的油分析数据,就要“排除干扰、消除误判断”。当检测出油中的气体分析数据值偏高或比前次数值增长较多时(应该确认数据的可靠性),应该仔细查对以便进行正确分析判断。这些是:

- (1)应该排除测试过程中(含取样)外来高浓度气体的影响;
- (2)了解该变压器在投运前是否有过故障的历史(原来故障所产生的气体残存在固体绝缘材料中逸出或是注入油时脱气不够彻底等);
- (3)油箱壳和油循环系统中(含管路)的某一部位是否经过补焊(这在专职人员中应该有记录);
- (4)有载分接开关油箱中的油是否有渗漏,造成与本体油箱中油相通(这在国产分接开关中是屡见不鲜的);
- (5)冷却器用潜油泵在运行中有否出现过磨叶轮或潜油泵电机扫膛;
- (6)套管形成的故障,表现在其渗、漏油到变压器油箱中(一般若正常检测套管油位时,可免除这一故障原因);
- (7)变压器自身的呼吸系统中不够畅通,有时可能在负压下运行,这将使油在负压下析出气泡并发生局部放电;
- (8)在变压器运行中曾遭受到外部回路的短路,或承受到异常过电压的作用,使油流发生涌动或析出气体;
- (9)在变压器内部应用了易分解气体的材料。

总之,通过对运行中变压器的监测,无论是确认为属正常老化所引起的气体产生或是经查出属于上述的某种原因,都有一个跟踪分析的过程。此时,可利用产气速率的方法进一步确认或证实有否故障。

第三,诊断或查对变压器特征气体时,要有重点、有区别地对待。因为在正常运行的变压器油中气体含量的绝对值与其电压等级(工作场强)、容量、密封方式、运行方式和运行年限等有密切关系。因此,在查对“注意值”时应给予充分考虑(例如 500kV 变压器,因其工作电压高或工作场强大、重要性大、容量也大,所以对其要求要严格些)。由于“注意值”中乙炔含量反映故障的危险性较大,所以在电力部门颁发的《电力设备预防性试验规程》中对 500kV 变压器作了较为严格的规定,预计不久将会体现在《导则》中。

第四,对进口的变压器要区别对待。由于进口变压器的内部结构和用油的质量、型号等与国内

不尽相同,因此按《导则》推荐的“注意值”来要求不尽适合。另外,国外的一些相应标准或厂家推荐的“注意值”亦不尽相同。因此《导则》值可作为重要的参考。

电力部门颁发的《电力设备预防性试验规程》对油中溶解气体含量的“注意值”规定如表 30-3 所示。

2 考察气体的产气速率

正常运行的变压器,于热和电场作用下也会发生老化分解并分解出少量的可燃性气体,产气速率很缓慢。但当变压器内部存在故障时,这些气体的产气速率就会加快。因

此,产气的速率对反映变压器故障的存在和严重程度及其发展的趋势等更加直接和明显。考察产气的速率不仅可以进一步确定故障情况,还可以对故障的性质作出初步的估计。

在《导则》中推荐了两种计算产气速率的方法,及其总烃含量的“注意值”。

第一,绝对产气速率的计算公式:每个运行小时产生的某种气体组分体积数的平均值。单位为 mL/h。

$$r_a = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{\Delta t} \cdot \frac{G}{d}$$

式中 r_a ——绝对产气速率, mL/h;

C_{i2} ——第二次取样测得油中气体组分(i)含量, $\mu\text{L/L}$;

C_{i1} ——第一次取样测得油中气体组分(i)含量, $\mu\text{L/L}$;

Δt ——二次取样时间间隔的实际运行时间, h;

G ——设备的总油量, t;

d ——油的密度, t/m^3 。

第二,相对产气速率的计算公式:每个月某种气体含量增加原有值的百分数的平均值。单位为%/月。

$$r_r = \frac{C_{i2} - C_{i1}}{C_{i1}} \cdot \frac{1}{\Delta t} \times 100\%$$

式中 r_r ——相对产气速率, %/月;

Δt ——二次取样分析时间间隔的实际运行时间(月)。

其余符号意义同前。

第三,变压器的总烃产气速率的“注意值”。

(1)绝对产气速率“注意值”:

开放式变压器 0.25mL/h

表 30-3 油中溶解气体含量的注意值

设备	气体组分	DL/T596-1996<预试规程>注意值/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$
变压器和电抗器	总烃	150
	乙炔	5(500kV 变压器为 1)
	氢	150
电流互感器	总烃	100
	乙炔	2(110kV 及以下)、1(220kV~500kV)
	氢	150
电压互感器	总烃	100
	乙炔	2
	氢	150
套管	甲烷	100
	乙炔	2(110kV 及以下)、1(220kV~500kV)
	氢	500
充油电缆	可燃气体总量	1 500
	乙炔	痕量
	氢	500
	其他	CO100; CO ₂ 1 000; CH ₄ 200; C ₂ H ₂ 200; C ₂ H ₄ 200

密封式变压器 0.5mL/h

(2)相对产气速率“注意值”为 10%

在考察变压器的产气速率时应注意:

第一,在所预定的考察产气速率期间,应尽量使变压器的负载、散热条件保持稳定,如果需要考察产气速率与负载间的相互关系,可有计划地改变负载;

第二,对于新安装和大修后的变压器,在投运后的一个阶段时间内,经多次准确测定油中气体含量的“起始值”后,才能对它的产气速率进行正式考察;

第三,如果变压器油已经过脱气处理或其运行时间很短且油中的含气量很低时,不宜采用相对产气速率判据,以免带来较大误差。

3 考察油色谱分析中的三对比值状况

由前述的油和纸绝缘材料热分解产生气体的试验和通过实践所验证的结果,明确了变压器内部的故障性质与其油中溶解气体含量间的特征关系。另外,还认识到判断变压器的故障类型不能仅限于油色谱分析中得到的气体浓度的绝对数值,而更应注意各种气体组分间的相对含量关系(即比值)。

当前,国内外已普遍地应用油中某些气体浓度的比值来判断变压器的故障情况。

应该提及的是:这种比值法是依据烃类气体中的甲烷、乙烷、乙烯和乙炔,最大产气速率的温度

表 30-4 “三比值”法的编码规则

特征气体的比值	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
<0.1	0	1	0
0.1~1	1	0	0
1~3	1	2	1
>3	2	2	2

表 30-5 判断故障性质的“三比值”法

序号	故障性质	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	典 型 例 子
0	无故障	0	0	0	正常老化
1	低能量密度的局部放电	0*	1	0	含气空腔中放电,这种空腔是由于不完全浸渍、气体过饱和和空吸作用或高温度原因造成
2	高能量密度的局部放电	1	1	0	含气空腔中放电,这种空腔是由于不完全浸渍、气体过饱和和空吸作用或高温度原因造成。但已导致固体绝缘的放电痕迹或穿孔
3	低能量放电 ^①	1~2	1	1~2	不同电位的不良接触点间或悬浮电位的连续火花放电,固体绝缘材料之间油的击穿
4	高能量放电	1	0	2	有工频续流放电,绕组、线匝之间或绕组对地之间油的电弧击穿,有载分接开关的选择开关切断电流
5	低于 150℃低温过热故障 ^②	0	0	1	通常包括有绝缘的导线过热
6	150℃~300℃低温过热故障 ^③	0	2	0	由于磁通集中引起铁心局部过热,热点温度依下述情况为序: 铁心中的小热点铁心短路,由此引起的铜过热,接头或接触不良(形成焦炭),铁心和外壳之间的环流
7	300℃~700℃中温过热故障	0	2	1	
8	高于 700℃高温过热故障 ^④	0	2	2	

注: * C_2H_2 和 C_2H_4 含量均未达到应引起注意的值;

①随着火花放电强度的增长,特征气体的比值有如下增长趋势: $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ 的比值从 0.1~3 增加到 3 以上, $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ 比值从 0.1~3 增加到 3 以上;

②在这一情况中,说明了 $\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$ 比值的变化,气体主要来自固体绝缘材料的分解;

③这种故障情况通常由气体浓度的不断增加来反映。 $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ 的比值一般大约为 1。实际值的大小与很多因素有关,如油的保护系统的方式,实际的温度水平和油的质量等;

④ C_2H_2 含量的增加表明热点温度可能高于 1000℃。

是依次增加为基础而提出来的。

“三比值”法的应用,已在《导则》中作了推荐和规定。

由于“三比值”法在判断变压器故障中占有重要位置,应予详述。所谓“三比值”,通常是用五种气体组成 $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ 、 $\frac{CH_4}{H_2}$ 、 $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ 的三对比值。对比值的范围在《导则》中确定了编码规则,以及故障的编码组合。经过国内外长期的实践,对这些比值进行了巧妙编排,使无故障的三对比值的编码正好都为零。又根据实验的研究结果提出了比值变化时可能的温度范围,从而比较确切地体现了特征气体与故障能量间的关系。

“三比值”法的编码规则和判断方法列在表 30-4 和表 30-5 中。

4 要调查了解被判断变压器的相关情况

上面叙述了有关油色谱分析对变压器故障的一些数据和方法。在判别故障时,还应了解它的结构、安装、运行和检修情况,以弄清楚气体产生的真实原因。即应根据了解到的情况结合油色谱分析数据进行综合判断。

第五节 对变压器油中 CO、CO₂ 的判断

如前所述,CO 和 CO₂ 的含量虽可作为判断变压器油和纸绝缘材料中分解的特征气体。但由于影响分解出这两种气体和其在油中溶解的因素较多,使测得的数据分散性较大,造成在判断中的不确定性增大。对于危及固体绝缘的故障,如果故障源的功率足够大、温度很高,就会有烃类气体产生,此时的 CO 和 CO₂ 可作为辅助指标,对分析故障有一定的作用。相反,属于低温的局部过热会加速该区域附近的绝缘老化,从而缩短变压器的使用寿命。但在此情况下由于油中分解的气体较少,CO 和 CO₂ 含量的增加也可能并不显著。因此,在《导则》中规定用其含量或比值来判断故障还是有一定困难的。

然而,近些年的运行经验表明:当 CO 和 CO₂ 的含量数值达到一定数量级且不呈某一规律时,则应认为是固体绝缘(如主绝缘和匝绝缘)故障且有事故实例。据此,有关部门曾对东北电网中运行的多台大型变压器的 CO 和 CO₂ 含量与运行时间的关系作了统计分析。在统计分析中发现:在一年内测得几次油中的 CO 和 CO₂ 含量分散值较大,最大值是最小值的 2 倍多。一般来说,头年的 12 月至翌年 5 月间的分析值较低,而每年的 6~10 月间分析值较高,这说明环境温度变化对 CO 和 CO₂ 的含量有较大影响。尽管如此,但若以年平均值作为基础点进行统计分析,便可消除这一环境温度的影响,而比较清晰地找出 CO 和 CO₂ 含量与运行年限间的关系,这对找出用 CO 和 CO₂ 含量判断故障提供了可应用的分析方法。

经过不同运行年限变压器的 CO 和 CO₂ 的含量数据,运用统计概率方法,可分别得出 CO 和 CO₂ 含量与运行年限间的关系是:

$$y_{CO}=133+407\sqrt{x}$$

$$y_{CO_2}=1\ 869+1\ 042x$$

式中 x ——运行年限。

将上述回归方程绘成曲线,则如图 30-1 和图 30-2 所示。由概率理论可知,图 30-1 和图 30-2 的曲线下方为大概率区域范围,统计表明,绝大部分运行的变压器的 CO 和 CO₂ 的含量分布在此范围内,表示变压器是在正常运行。当变压器的 CO 和 CO₂ 含量大于该曲线上相应值时,一般可认为变压器可能出现异常情况。

另外,CO 和 CO₂ 含量既是绝缘正常老化的产物,也是表征故障的特征气体。其两者之间的区

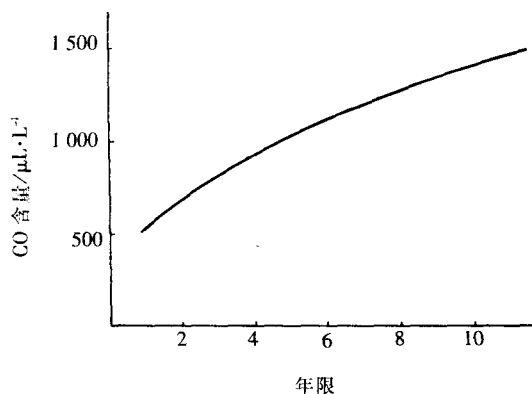


图 30-1 隔膜式变压器 CO 含量的判断指标

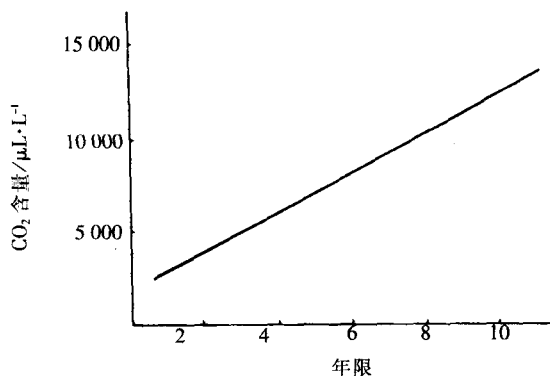


图 30-2 隔膜式变压器 CO₂ 含量的判断指标

别是绝缘老化速度不同。由上述方程式表明,正常的产气速率分别是:

$$\text{CO}: \leq \frac{407}{2\sqrt{x}} \mu\text{L}/\text{L}(\text{年})$$

$$\text{CO}_2: \leq 1042 \mu\text{L}/\text{L}(\text{年})$$

利用上述判据,对绕组采用带有绕包绝缘的换位导线(为不自粘热固化)的变压器,进行 CO 和 CO₂ 含量测量分析,曾发现一台 260MVA 变压器油中 CO 和 CO₂ 含量已超过判据范围,但总烃(C₁+C₂)含量并不高。将该变压器的 CO 和 CO₂ 含量随运行年限变化的曲线,与判据比较得到图 30-3 所示的波形。由于此台变压器在机组小修时曾多次进行过油处理,所以曲线的规律不够平滑。但发展的趋势却可明显地表现出来,无论从 CO 和 CO₂ 含量的规律还是其绝对值都超过了判据所示的曲线,中间的下降是处理油的影响,但下降后仍按较高速率增长,这足可说明问题的存在。由此,结合油中糠醛分析和变压器绕组的结构情况,分析认为变压器可能存在低温的大面积过热性故障。退出运行后解体检查发现:低压绕组横向油道有明显的堵塞且有黑烟冒出的痕迹,绝缘纸已呈黑红色。究其原因可能是线段间的油道变小或堵塞,使绕组的绕包绝缘过热并达到焦糊的程度。

由上述统计分析可见,CO 和 CO₂ 含量的绝对值及其曲线的斜率,可作为判断变压器固体绝缘状态的指标。因此,当油中的 CO 和 CO₂ 含量超过上述公式的计算值或产气速率大于曲线的斜率时,应引起足够注意。

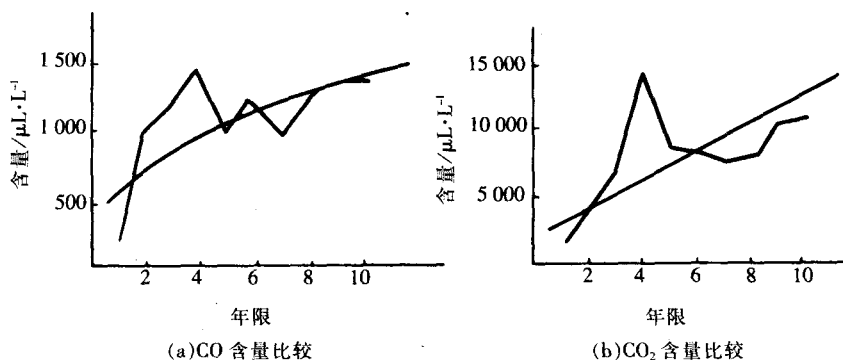


图 30-3 260MVA 变压器 CO、CO₂ 含量与判据比较

第六节 一些不同类型故障实例和故障点查找

以上对变压器各种故障在油色谱分析中的表现作了叙述。为了加深对上述的各种分析和判断的理解以及实际操作中的应用,按不同故障类型的实例列举在下面,供读者参考。

应该指出的是:油色谱分析的结果只能定性地说 明故障的存在和其严重程度,若确切地查找 出故障点和形成的原因,尚需借助于电气测量和分析技术。而直观检查还是很重要的。

为叙述方便,把所收集到的故障实例分为两类:一是与磁有关的故障:包括铁心、接地隔屏、磁 屏蔽和压钉碗等;另一是与电有关的故障:包括导电回路、分接开关、导管分流、漏磁形成的过程和 放电等。

1 与磁回路有关的故障实例

【例 1】某发电厂一台 ODFPS-120000/500 变压器(A 相),自 1985 年投运以来,在对绝缘油的 色谱分析中,发现可燃性气体有缓慢的增长趋势。而从 1993 年下半年起,可燃性气体的增长速率 更为明显,此时用“三比值”法编码为 0,2,1(见表 30-6),经过分析判断认为是铁心回路中存在 300℃~700℃的中温过热性故障。

表 30-6 ODFPS-120000/500 变压器油色谱分析数据 μL/L

分析日期	H ₂	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₁ +C ₂ (总烃)	CO	CO ₂	三比值
1991.12	20	0.38	41.9	20.2	44.2	106.7	570	815	0,2,1
1992.12	26.7	0.5	90.6	49.2	95	235.3	674	995	0,2,1
1993.12	46.9	0.56	161.6	94.1	193.3	450.2	738	1 081	0,2,1
1994.6	230	0.51	572.4	343	768.9	1 684.8	809	1 661	0,2,1
1994.11	159.8	0.38	438.7	312.4	644.6	1 396.1	891	1 473	0,2,1
1995.3	128	0.35	419	269.4	614.1	1 302.9	833	1 423	0,2,1

由于是 500kV 等级的变压器,运行位置很重要,于是由制造厂和运行部门共同对它进行了吊 检,结果发现上铁轭靠高压侧临近钢夹件的铁心片中有故障。是由于插片时有少数硅钢片左右窜 位,使接缝处有搭接现象,在磁通作用下产生环流,形成放电和过热。另外,还看到在故障点的周围 已有较大面积的积炭,且靠近此处的夹件绝缘也被烧成一些通沟。经局部修补了夹件绝缘,并调整 了硅钢片的搭接(用纸板隔开)。经修理后此台变压器在运行中油色谱监视一直很正常。

【例 2】某变电站一台 OSFPSL-120000/220 变压器,投运数年后于 1990 年开始发现油色谱分 析数据显示有潜伏性故障,油色谱分析结果如表 30-7 所示。“三比值法”的编码组合为 0,2,2,属于 过热性故障。

表 30-7 OSFPSL-120000/220 变压器油色谱分析数据 μL/L

油中组分 分析日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	C ₁ +C ₂
1990.3.2	79.99	120.64	28.77	297.47	18.91	765.80	7 809.80	465.79
1990.3.6	77.54	127.70	25.48	267.67	19.91	758.20	7 797.50	440.76
1990.3.8	80.50	153.54	42.61	276.00	18.37	755.70	7 799.90	490.52
1990.3.10	76.01	114.67	40.57	276.00	15.23	727.60	10 851.00	446.47
1990.3.12	131.87	162.10	29.08	314.70	22.45	783.20	9 268.20	528.33
1990.3.14	107.22	143.88	31.10	290.68	21.83	882.60	9 272.10	487.49
1990.3.16	98.73	123.58	33.56	296.24	16.08	749.80	7 849.70	469.46
1990.3.19	109.59	133.96	39.30	361.00	23.43	760.70	7 870.60	557.69

电气试验未发现问题。后来经吊开钟罩后发现铁心的接地铜片变色,油箱底集油管的联管口有 黑色微弱放电痕迹。经过分析认为是铁心的上、下铁轭夹件间有短路环流造成的,如图 30-4 中虚 线所示,下铁轭与之相类似。

【例 3】某变电站一台 220kV 变压器在预防监测中取油样作色谱分析时,发现油的总烃值严重超标,达到 910 $\mu\text{L/L}$,而且乙炔也达到了 12 $\mu\text{L/L}$,又通过“三比值”法分析,说明热故障正迅速发展。各次油色谱分析结果如表 30-8 所示。

对此故障的基本分析:通过“三比值”法计算,其编码均为 0,2,2,是高于 700 $^{\circ}\text{C}$ 高温范围的热故障,而乙炔含量的增加表明热点温度可能高于 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 。由故障点的产气速率分析:第 3、4 天的 18h 的绝对产气率:总烃为 97 mL/h ,乙炔为 4.7 mL/h ,第 5、6 天的 23h 的绝对产气率:总烃为 135 mL/h ,乙炔为 5.1 mL/h ,乙烯为 97.1 mL/h 。从一氧化碳和二氧化碳的含量显示,故障未涉及固体绝缘,所进行的电气试验亦未见异常。又对所附属 9 台潜油泵作了仔细检查未见异常,这说明故障的气体来源于变压器本体中。

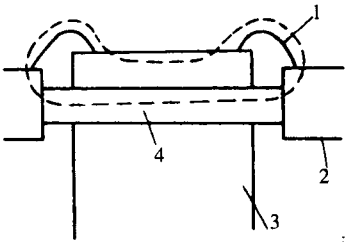


图 30-4 上铁轭环流

1—接地片 2—夹件 3—铁轭
4—方铁

表 30-8 220kV 变压器油色谱分析结果

$\mu\text{L/L}$

取样日期	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2	C_1+C_2
第 1 天	32	158	110	630	12	154	2 770	910
第 2 天	63	213	131	643	12	239	3 408	999
第 3 天	54	214	131	735	13	204	3 494	1 093
第 4 天	57	225	133	781	16	206	3 486	1 155
第 5 天	66	245	145	876	20	246	3 545	1 286
第 6 天	64	250	145	846	23	265	3 887	1 264

经吊开钟罩检查发现:低压侧上夹件内衬加强铁斜边与上铁轭的下部阶梯形棱边距离不够,加上运行中的振动,使之在 C 相端处相碰,形成了环流故障接地点,如图 30-5 所示。这样,就与原来的接地点形成环流发热。经过对故障点修理后,投运正常。

【例 4】某变电站一台 SFPSZ3-120000/220 变压器,在运行检测中发现油色谱分析有异常情况。其一个阶段的色谱分析数据如表 30-9 所示。

对此故障的基本分析:从表 30-9 可见自 5 月 30 日至 6 月 3 日其总烃均大于“注意值”150 $\mu\text{L/L}$,且增长速度很快, CH_4 和 C_2H_4 为主导成分。初步判断为过热性故

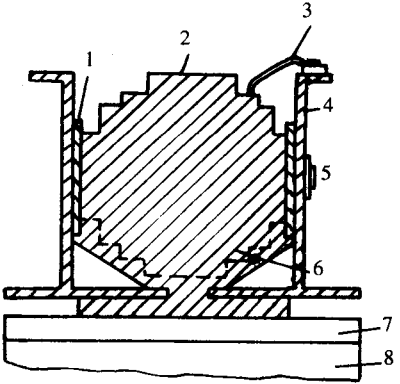


图 30-5 铁心的接地故障点

1—绝缘垫 2—上铁轭 3—接地 4—上夹件
5—低压侧 6—故障点 7—压环 8—相线圈

表 30-9 SFPSZ3-120000/220 变压器油色谱分析数据

$\mu\text{L/L}$

取样时间	油中组分								说明
	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	H_2	CO	CO_2	C_1+C_2	
5 月 30 日	240.5	107	297	0	41	686	790	644.5	不合格
6 月 3 日	290	147	355	0	12	1 373	709	792	不合格
6 月 3 日	290	149	373	0	58	1 031	1 584	812	8 个油泵部位的油的分析数据
6 月 14 日	26	21	47	0	0	83	289	94	检修后投运前本体油的分析数据
6 月 23 日	23	19	43	0	0	—	—	85	投运 3 天后本体油的分析数据

障。又依据“三比值”法,其编码组合为 0,2,1,所以可进一步判断故障性质为 300℃~700℃中等温度范围的过热故障。通过电气测试发现铁心有接地现象,对地绝缘电阻只有 2Ω。

用电气方法进行了部位的查找,其结果是:当将交流电压施加在铁轭和夹件上后(施加电压 20V~30V)即发现在 220kV 侧的铁轭上角,C 相外侧铁心柱上部,铁心与铁轭之间的一块绝缘木板顶部中间有放电声响和白色的烟。初步判定故障部位是由于有一金属异物掉到铁轭处短路了部分铁心所致。烧坏了电工绝缘板形成接地,产生过热。

经过检修处理了铁轭片后,铁心绝缘电阻上升至 140MΩ,投运后监视油色谱正常。

【例 5】某水电厂一台 SSPS₁-360000/220 变压器,于 1984 年 7 月 8 日投入运行,所带负载为 180MW~200MW(机组侧)。在新投入 24 天后进行油色谱分析时,发现其总烃含量猛增,且乙炔含量很大。数据如表 30-10 所示。

表 30-10 SSPS₁-360000/220 变压器油色谱分析数据 μL/L

油中组分 取样日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₁ +C ₂	CO	CO ₂	O ₂	测试单位
3 月 15 日(投运前)	-	0.5	3	0.3	0	-	-	3.8	3	297	-	东北电力试验研究院
7 月 31 日(投运后)	32 346	12 211	30 321	4 158	536	-	-	47 226	71	863	-	沈阳电业局
8 月 1 日	低压侧	9 422	10 485	4 962	545	2 461	25 557	25 414	2 955	2 184	-	吉林热电厂
	高压侧	(5 000)	10 689	11 786	11 189	571	2 405	28 548	34 235	3 708	4 880	
8 月 11 日	4 020	15 850	22 621	9 057	535	-	-	48 063	94	828	-	吉林电力试验研究所

由表 30-10 中的数据可以看出:总烃含量极高,氢含量也很高,表征放电故障的乙炔含量亦高达数百 μL/L。由于是在运行中,所以当时分析:主要是在磁回路中存在大面积的过热故障,乙炔的增高是由严重的过热形成的。在现场作了一系列的电气试验均未能给出确切的过热故障的原因。于是决定将此台变压器返回制造厂解体作彻底检查处理。解体后拔掉三相绕组(每相为四个绕组,是高、低、低、高结构)靠近铁心柱表面纸板有烧焦痕迹,具体是在 a、c 相铁心柱共三处故障点,其中 a 相铁心柱上部及下部各一处,c 相铁心柱下部一处,其故障的总体布置如图 30-6 所示。

(1)a 相上部故障点。经拔出四个绕组且只剩一层撑条时,发现靠 b 相的一根撑条上端部靠铁心表面烧有 φ150mm 左右的焦糊深坑。与撑条相靠近的绝缘纸板和铜片屏蔽筒也被烧有 φ200mm 左右的大孔洞。当将绝缘筒与屏蔽筒拆掉时,上部的引线铜片已烧熔,表面绝缘烧焦。在横引线铜片插入第一级(大级)铁心棱角处相碰并烧断成三截。在接地引线铜片烧断的对应位置的铁心柱上有烧熔铁屑堆痕,铁心柱短路厚度约 70mm,最深处约 2mm。这是靠近 b 相这半个铜片屏蔽筒(即屏蔽铁心柱表面多棱角用,俗称接地隔屏,下同)故障的情形。

(2)a 相下部故障点。当拆除到只剩下铜片屏蔽筒和铁心柱后,在 a 相铁心柱下部靠近旁轭方

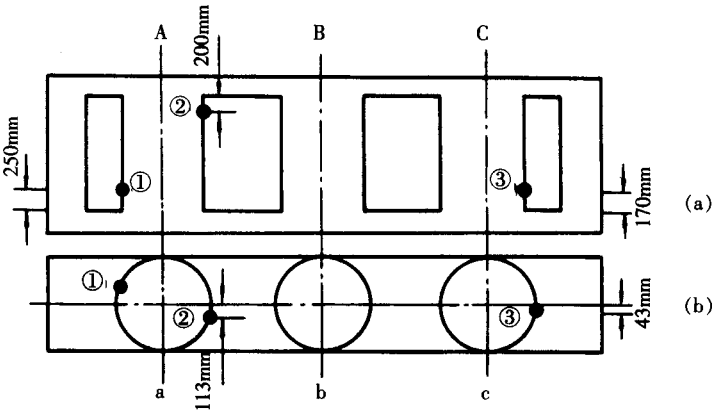


图 30-6 故障点总体位置示意图

(a)低压侧 (b)高压侧

向又有一处故障点,铁心柱被短路厚度约 25mm,铜片屏蔽筒的横引线铜片也已烧断,铁心柱亦有烧焊熔流物,但不太深(未见坑)。这是另半个接地隔屏的故障情形。

(3)c 相下部故障点。与 a 相故障点相似,但铁心柱与接地隔屏横引线铜片烧损的程度较轻些,尚未达到烧断和熔出坑的程度(但其纸筒亦烧成 $\phi 100$ 左右的大洞)。其位置在 c 相旁轭方向,距下铁轭边缘 170cm,靠高压出线侧的第一级铁心厚度短路约 30mm,横引线铜片烧熔两道豁口。

造成此台变压器的这一重大故障的根本原因,是接地隔屏在结构上不够合理。这种用竖铜片组成的半个屏蔽筒后用一根铜片横向相连后插入到铁心柱中,在绕组组装过程中经挤压、位移和扭动,造成此横向连接铜片几处短路铁心柱,引起大面积过热故障。经将此接地隔屏改成横条铜片结构,用竖条铜片联接各横条铜片后引至夹件处接地,使问题得到了妥善解决。

在此电厂运行的另台变压器(与此台变压器参数和结构相同)也返厂作了解体检査,故障原因与修复情况与此台变压器相同。

【例 6】某变电站一台 DFPS-250000/500 变压器(C 相),在 1984 年投入试运行后,即发现油中色谱分析数据不正常(见表 30-11),被迫停运。经初步分析认为,故障的原因主要是电压作用(即磁路故障)。因负载很低。

表 30-11 DFPS-250000/500 油色谱分析数据

分析日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂	CO	CO ₂	备注
1983.8.23	无	2	1	1	无	4	12	121.7	调试前
1983.8.29	3	27	7	53	痕	87	60	478	调试后
1984.1.28	8	36	9	70	0.8	115.8	52	370	投运 24h
1984.2.5	24	185	40	400	7.0	632	280	458	投运一周

1984 年 10 月,会同工厂在运行现场的检修间对此台变压器进行了吊开钟罩检查,结果发现 500kV 绕组引出线与裸铜电缆连接处的绝缘层有局部放电烧伤痕迹,面积约 25mm×25mm,深度约 1mm,见图 30-7。

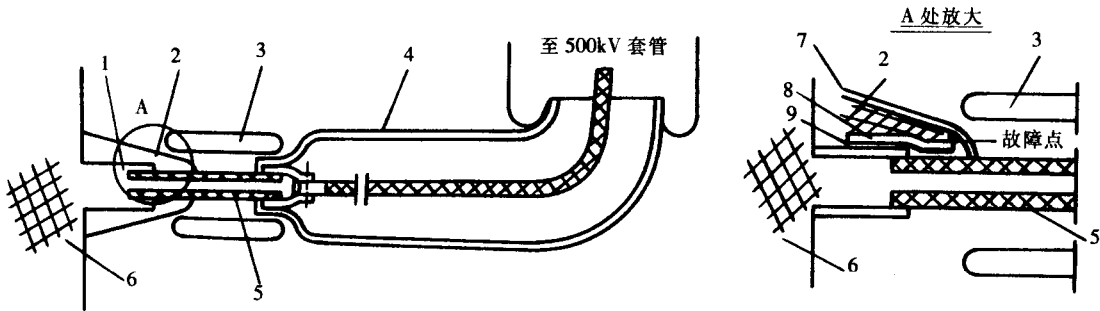


图 30-7 C 相主变压器现场吊罩检查位置示意图

1—500kV 绕组引出线 2—锥状绝缘 3—金属管 4—扩径铜管 $\phi 200\text{mm}$ 5—软电缆 150mm×4 6—500kV 绕组
7—白布带 8—铝箔 9—薄铜皮

对于上述的故障,在现场进行了仔细处理和包扎,于 1984 年 12 月又投入空载带电考核。经过很短时间的运行。就又发现油中的总烃含量仍在急剧上升,这说明还存在另外的故障点,且在运行现场已无能力再行处理。

于是在 1985 年 2 月返回制造厂进行了彻底的试验和检查,结果发现在该变压器 A 柱旁轭的接地屏中最下边一条 80mm 宽的紫铜带,因装配不好,被折断并触及到下铁轭上面,其两个接触点

横跨下铁轭约 130mm,在铜带上与其接触处烧有两个 25mm×25mm 的缺口,相对应的下铁轭位置有豆粒大的疤痕。经过处理并更换新部件后,返回现场运行,情况正常。

【例 7】某电厂一台 DFP-240000/500 D 相变压器,由于 C 相变压器故障用其替运行。自投运之后,在油的色谱监测中乙炔值由痕量逐渐增长。经过用超声波定位判明为高压侧油箱上的磁屏蔽中故障。1994 年 3 月份停运,进入检查并拆除了高压出线(油箱)处的适形磁屏蔽,于 3 月 24 日又投运。之后,乙炔值及烃类气体增长速率仍较快,运行至 7 月 4 日,乙炔值由痕量又增至 3.5 $\mu\text{L/L}$,总烃值由 8 $\mu\text{L/L}$ 增至 1 390 $\mu\text{L/L}$ 。三比值的编码数值为 0,2,2(见表 30-12),判明是高于 700℃的高温范围过热故障。经分析认为还是高压出线孔(油箱)处的适形磁屏蔽出现故障所致。

表 30-12 DFP-240000/500 变压器油色谱分析数据

分析日期	H ₂	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₁ +C ₂	CO	CO ₂	三比值
1994.3.26	4.5	0.29	6.3	2.1	13	21.7	4	147	0,2,2
1994.4.12	35.1	1.1	50.6	16.1	93	160.8	20.5	305	0,2,2
1994.5.30	105	1.8	169.4	59.1	347.6	577.9	76	477	0,2,2
1994.6.17	199	2.8	317	122	623	1 064.8	162	859	0,2,2
1994.7.4	236	35	410.2	159	817.3	1 421.5	200	893	0,2,2

为彻底消除故障,于 1995 年 3 月对该变压器的高压出线孔(油箱)处所有的适形磁屏蔽都作了拆除和处理(在这些磁屏蔽边缘已出现多处放电烧痕)。在其他变压器上也发现此问题,处理情况与此台相似。

【例 8】某变电站花 1 号主变压器,在 1998 年 3 月 31 日时值中雨天,出现轻瓦斯动作信号。经检查发现铁心外引的铜质 16mm² 绝缘线的绝缘皮烧坏,已成裸导线。取气体和油样进行色谱分析,结果见表 30-13。

表 30-13 花 1 号主变压器油色谱分析数据

取样时间	组分 取样部位	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂	CO	CO ₂	O ₂	三比值 编码	事故性质
1998.3.31	上部(气体)	11 990	2 234	22	378	98	2 730	263	2 359	痕	1,0,2	放电性故障
1998.3.31	上部(油样)	1 676	517	14	204	22	757	341	2 075	痕	1,0,2	放电性故障
1998.4.1		104	159	13	165	20	357	302	1 666	痕	1,2,2	电弧放电兼过热性故障
1998.3.31	下部(油样)	94	195	14	153	15	377	312	1 868	1 094	0,2,2	高于 700℃高温过热性故障
1998.4.1		97	140	11	174	19.4	344.9	318	1 831	痕	1,2,2	电弧放电兼过热性故障

故障原因的分析和处理如下:

(1)低压侧(10kV)频发的短路是导致本次故障的直接原因。据统计,1996 年 5 月至故障发生,该站 10kV 工段出线共发生 37 次短路冲击。每次冲击产生的机械力,使主变的压紧组件(压钉绝缘磁)挤碎,促使短接钢压板和上夹件,造成开环运行的钢压板形成闭合回路并有较大的短路电流。

(2)主变铁心内引接地线在靠近套管外因大修时受过损伤绝缘有所降低。当主磁通因上述原因(压板间形成的环流不稳定)发生畸变,产生变化的奇次谐波通过油箱时,感应出大的电势击穿铁心引出套管处的引线绝缘并烧损绝缘,引下线熔锡脱落。

(3)经按工艺要求处理了所有的损伤处,更换了新的铜引下线后主变恢复正常运行。

【例 9】某变电站白 1 号主变压器,在 1998 年 12 月 10 日油色谱分析结果表明变压器存在过热性故障,但经其他电气试验结果皆为正常。经 1999 年 4 月 12 日色谱跟踪取样分析结果说明其故障

性质未变,且有进一步恶化趋势。其后,为监视其产气率,就缩短了取样周期,所测结果相同,且故障速度加快,证实该主变内部确有高温过热性故障且还在继续发展(见表 30-14)。

表 30-14 白 1 号主变油色谱分析结果

μL/L

样品 编号	取样时间	组分 取样部位	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂	O ₂	CO	CO ₂	三比值 编码	绝对产气率 $r_g/\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$	事故性质
1	1998.12.14	下部	56	27	20	108	6	161	14 088	586	894	0,0,2	9.52	高温过热性故障, $r_g>0.5$
2	1999.4.12	下部	87	87	26	218	7.5	338.4	9 692	469	648	0,2,2	0.87	高温(822℃) 过热性故障
3	1999.4.16	下部	82	81	33	224	5.4	343.5	3 877	485	729	0,2,2	0.6	同上, $T=793^\circ\text{C}$
4	1999.4.12	下部	88	83	28	196	7.7	314.7	7 547	545	816	0,0,2		同上, $T=793^\circ\text{C}$
5	1999.5.6	下部	180	97	34	271	8	410	9 944	565	892	0,0,2		同上, $T=815^\circ\text{C}$
6	1999.5.6	下部	121	69	32	268	8	377	5 929	634	984	0,0,2	2.2	同上, $T=822^\circ\text{C}$
7	1999.5.18	下部	92	62	35	280	11	388	10 376	509	975	0,0,2		同上, $T=816^\circ\text{C}$

注:表中温度 T 是利用日本月冈、大江等人提出的试验公式: $T=332\ln(C_2H_4/C_2H_6)+525^\circ\text{C}$ 计算出来的。

经常规的电气试验显示,绕组的直流电阻等皆正常,排除了绕组引线部分连接点过热或选择开关飞弧引起高热的可能性。

经用“三比值”法进一步判断证实此故障性质属磁路过热性。在 1995 年改造过程中发现,该铁心存在有多点接地现象,为确切确定故障的性质和部位,1999 年 5 月 17 日对其进行空载试验,发现 I_0 增大了 21%, P_0 增长了 8.5%,同时 ab 相较 bc 相的 P_0 大 8%~10%(ab 与 bc 相应为对称磁路),铁心对地绝缘为零。至此,可确定该主变的铁心为多点接地故障。原来在 1995 年对它进行大修时曾发现 ab 相下铁轭硅钢片鼓包并碰到穿心螺杆上。虽经处理,但经运行中的振动后再次形成多点接地。

由于此台变压器当时无法停运进行检查故障,而必须坚持运行至 5 月底,只好采取图 30-8 所示的方法,试图强迫其铁心只在一点接地方式下运行。在 K 断开时,可以将接地引线中流过的电流限制在 30mA 以下。

在 1999 年 5 月 29 日,对该变压器进行吊罩检查时,发现下夹件至铁心间绝缘电阻为零且能听到明显的放电声。将器身吊起,在检查其低压侧 ab 相底部时,又发现穿心螺杆、下夹件与铁轭间有放电痕迹,但夹件与铁轭间无连接点,经分析认为是在起吊过程中该连接点自然分离所致。经现场处理了下夹件绝缘和更换穿心螺杆绝缘后,再次测量绝缘电阻皆良好。至此,故障点清除,多点接地的现象消失。投运后油色谱监测数据正常,铁心对地绝缘电阻良好。

【例 10】某电厂一台 SFP-120000/220 变压器,自 1987 年大修改造后,油的色谱分析数据一直不够正常,但由于其运行位置的特殊性(涉及到机组)只好坚持运行。此时的乙炔含量以每月 $3\mu\text{L/L}\sim 5\mu\text{L/L}$ 速度增长,其总烃含量值 $100\mu\text{L/L}\sim 200\mu\text{L/L}$,坚持到 1991 年 6 月大修期,此时的乙炔含量已达 $36.6\mu\text{L/L}$,而且总烃含量仍维持在上述数值左右。

经吊开钟罩后仔细检查了有否存在悬浮放电的部位,当查到正压钉部位时,即发现钢压钉的一个钢碗有松动,取下后见到钢碗底部平面有不少放电麻点,钢碗中的油已呈墨汁状,共发现有 7 根

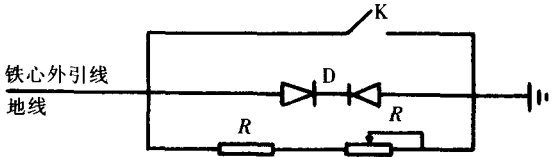


图 30-8 限制主变多点接地临时措施电气原理图

K—100A 空气开关 D—200A、800V 硅堆
R—150Ω、200V、5A 的固定式和可调式电阻

钢压钉有此情况。经过检修清理并把钢压钉拧紧,并将油进行了充分脱气后,投运数年来油色谱分析值一直正常。

此后,依据这一经验教训,又查出了某变电站 DFPS-250000/500(A 相)变压器,其油中的乙炔含量已达 $16.5\mu\text{L/L}$,占总烃值的 38%。经一系列的电气试验均未能给出确切结果。后经吊开钟罩后检查发现:有 5 根钢压钉的钢碗有松动,而其钢碗内亦有较多的放电小麻点(在钢压钉的螺纹处也有此小麻点),钢碗中的存油也已呈墨汁状。经过清理并拧紧钢压钉后,投运数年来油中的乙炔值一直维持到较低数值($1\mu\text{L/L}\sim 2\mu\text{L/L}$)。

其他如 SFP-240000/220 和 SFP-120000/220 等几台变压器也都发现了相似情况(经油中色谱分析监测),经过上述方式处理后,投运数年情况正常。

鉴于上述情况,认为凡是经运行三年左右的变压器,且油色谱分析中总烃值不是很大而乙炔成分占总烃值中较大比例,而在电气试验中又未能查出确切故障部位的情况下,则应判断为有悬浮电位故障。

经分析认为造成此类故障的原因是变压器经长期运行后,绕组的纵向绝缘(含线段间及端绝缘)在运行温度下形成干缩使绕组整体下沉,造成钢压钉与钢碗间松动或有小间隙,这就形成了悬浮放电。

据此,电力部门在制定的《变压器反事故措施》中对此问题作了明确规定:凡经运行三年的变压器(尤其重负载者)应停电拧紧钢压钉。

2 与电回路有关的故障实例

【例 1】某水电厂一台 SFP-120000/220 变压器,从 1966 年投入运行以来一直很正常。但 1991 年 2 月的油色谱分析中,发现它各种烃类气体较上次有明显增长,如表 30-15 所示。

表 30-15 SFP-120000/220 变压器油色谱分析结果

分析日期	油中组分/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$							
	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	C_1+C_2	H_2	CO	CO_2
1990.12.7	4.7	1.4	5.6	痕量	11.7	14	377	3 960
1991.2.5	238.9	58	476.7	6.75	780.4	133	242	2 715

由表 30-15 可以看到:总烃含量较高(达 $730\mu\text{L/L}$)且乙炔含量较高,而氢也高;在烃类气体中甲烷和乙烯占主导成分;一氧化碳和二氧化碳均无增加趋势,说明故障部位不涉及到固体绝缘材料。又根据“三比值”法,其编码组合为 0,2,2,所以可进一步判断故障性质为高于 700°C 高温范围的热故障。

为了进一步判断,停电后对高压侧绕组连同分接开关的直流电阻进行了测量。故障前后的直流电阻列在表 30-16 中。

由表 30-16 可见,C 相测量值比上次增大 12%。其变化如此之大,说明该相绕组有可能存在脱焊、断股、接触不良情况。

经分别测量了 C 相绕组的直流电阻和分接开关的接触电阻后,发现分接开关的接触电阻远大于正常值 $500\mu\Omega$ (达到了 $13\,000\mu\Omega$)。为此,又测量了分接开关的动、静触头间的接触电阻(见表 30-17),而分接开关的结构示意如图 30-9。

由表 30-17 可以认定故障点在第 4 定触头与动触环之间。经仔细查找发现第 4 定触头与动触

表 30-16 故障前后直流电阻测量值

测量日期	相别/ Ω		
	A	B	C
1990.6.12	0.726	0.726	0.725
1991.2.5	0.728	0.73	0.81

表 30-17 定触头与动触头间接触电阻

 $\mu\Omega$

动触头	1	2	3	4	5	6	7	8
第四定触头	14 500	14 200	14 000	14 000	14 800	16 000	14 500	14 200
第三定触头	18	24	8	6	9	15	30	22

环间有黑色炭化物,质地较硬。这说明是绝缘油在高温下的生成物。

造成分接开关接触不良的原因是倒动分接位置时未作往复活动,切换后只是测量了绕组的整相直流电阻,当时合格即投入运行。运行 4 个月由于运行振动再加上油膜等原因,在运行中出了故障。

【例 2】某电厂一台 SFPSL-120000/220 变压器,1979 年投入运行一直正常,但到 1987 年 4 月发现油中总烃含量急剧上升,如表 30-18 所示。由于总烃含量较高,而且甲烷和乙烯是主导成分,因此初步判断为过热性故障。根据“三比值”法,其编码组合为 0,2,2,则可进一步判断故障性质为高于 700℃高温范围的热故障。又从表 30-18 中油色谱跟踪分析的数据表明, C_1+C_2 基本上稳定,可以认为故障没有再继续发展。

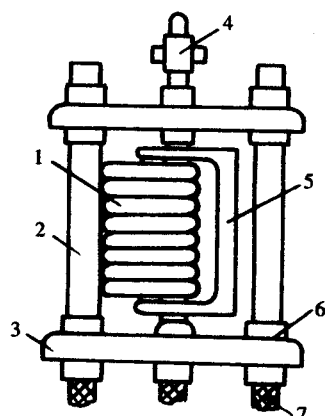


图 30-9 分接开关的结构示意图

1—动触头 2—定触头 3—胶木底座
4—调整拨插 5—回转轴 6—绝缘套
7—电缆引线

表 30-18 SFPSL-120000/220 变压器油色谱分析结果

分析日期	油中组分/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$							
	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	C_1+C_2	H_2	CO	CO_2
1984	5.3	8.2	29.0	2.1	44.6	13.6	224.0	4 466
1985	11.38	8.26	30.6	3.9	54.14	32.0	665.0	5 168
1986	10.90	5.01	21.6	2.3	39.81	39.0	782.0	5 903
1987.6.25	332.00	104.00	604.0	2.85	1 042.85	115.0	813.0	8 318
1987.7.6	375.00	124.00	678.4	2.85	1 180.25	100.6	777.0	7 741
1987.7.13	387.00	122.00	649.0	2.94	1 160.9	96.46	890.0	7 503
1987.7.18	407.00	119.60	648.5	2.53	1 177.63	123.0	906.0	7 921

根据上述的油色谱分析数据(含“三比值”法)并结合变压器结构进行分析,认为故障点可能在下述部位:铁心有两点接地或有局部短路;在高压侧的分接开关有接触不良;高、中、低压侧引线接触不良或有断股等。经进行下列电气试验后,认为铁心无两点接地和局部短路现象。对各侧绕组测量直流电阻时,高、低侧无异常,中压侧发现异常: $R_{AB}=0.103\Omega$, $R_{BC}=0.096\ 45\Omega$, $R_{AC}=0.102\ 5\Omega$,其线间电阻互差达 6.74%。由于此中压侧绕组为 d 接线,为了找出确切的故障部位,又经过分析和测量后,最后判断出故障点部位在 A 相套管根部附近。经检查套管导管与引线相接触,分流使引线烧断约 10%(引线截面为 423mm²)。经修复后投运正常(电阻值平衡,油色谱分析正常)。

【例 3】某变电站一台 SFPS-120000/220 变压器,从 1987 年投运后,油色谱分析中总烃含量一直维持在 100 $\mu\text{L/L}$ 左右,但乙炔都从痕量一直有增长趋势,至 1989 年已增长到 2 $\mu\text{L/L}$ 。1990 年预防性试验中发现在分接开关“V”分接位置时的绕组直流电阻大于另外两相(故障相为 B)。经多次转动此分接开关三相电阻基本一致。但经投运至 1991 年时,发现油色谱总烃值已增长到 700 $\mu\text{L/L}$,

乙炔值也已增加到 4.23 μ L/L。被迫停电,吊开钟罩检查发现高压侧 B 相开关的动、静触头均有较重烧痕(见图 30-10)。鉴于此分接开关的动触环的弹力极不均匀,最后在工厂的协助下更换了此相分接开关,变压器经过绝缘处理后投入运行,数年来油色谱分析数据正常。

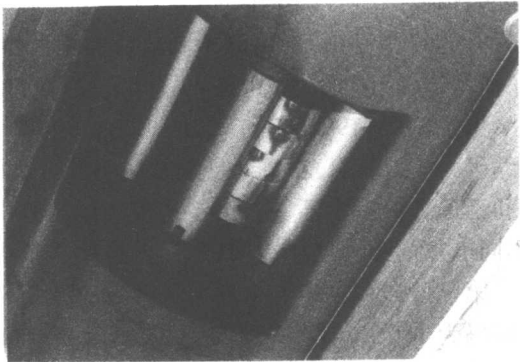


图 30-10 B 相分接开关被烧伤的情形

【例 4】某发电厂一台 SFP-370000/500 升压变压器,自投运至退出运行共历时 18 个月。此台变压器经 168h 试运行后,油色谱分析中有痕量乙炔,正式投运 3 个月内油的总烃值基本无变化,乙炔含量在 0.2 μ L/L~0.7 μ L/L 间变化。在以后的继续运行中,每停送电(非变压器原因)一次,乙炔含量即有微量的增长,且由小于 1 μ L/L 持续增长至 40 μ L/L 左右,而总烃中的乙烯、乙烷、甲烷等含量变化不大,但氢含量由最初的 15 μ L/L 增长到 150 μ L/L。

在此期间工厂曾带仪器对此变压器内部有否放电故障进行过超声定位,发现在冷却器下部与变压器之间的连接管路处有信号发出。经过分析认为可能是管路内的油流放电。电厂也进行了超声定位测试,其结果相似。鉴于 500kV 大型变压器在运行期间不长就出现乙炔和氢含量快速地增长,且严重超标的情况,就确定将此变压器返回工厂进行彻底地检查和修理。

自投入运行到退出运行的时间里,变压器主体内油的色谱分析数据摘录于表 30-19 中。

故障的分析和判断可分为三个阶段:

第一阶段是从投运至 1995 年 10 月 9 日停电前的 10 个月中,油色谱分析时的“三比值”编码为

表 30-19 变压器主体内油色谱分析数据

取样日期	三比值及编码									备 注
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	比值	编码	$\frac{CH_4}{H_2}$	比值	编码	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	比值	编码	
1994.12.20	0.2/0	00	2	2.9/1.3	2.23	2	0/0	0	-	
1995.4.24	0.6/0.7	0.86	1	2.6/6.8	0.38	0	0.7/1.0	0.7	0	
1995.5.16	0.6/0.7	0.86	1	4.9/11.9	0.41	0	0.7/19.4	0.036	0	
1995.7.17	1.2/0.8	1.5	1	9.3/16.6	0.56	0	0.8/22.4	0.036	0	
1995.9.5	痕/0.5	0	0	9.9/20.4	0.485	0	0.5/22.1	0.022 7	0	
1995.10.9	0.2/1.0	0.2	1	5.1/21.6	0.236	0	1.0/37.5	0.027	0	停电
1995.11.15	4.21/3.77	1.12	1	8.08/29	0.279	0	3.77/1.21	3.12	2	送电
1996.1.22	5.9/4.6	1.28	1	9.9/43.4	0.23	0	4.6/2.7	1.7	1	
1996.2.23	4.84/1.29	3.75	2	4.88/44.6	0.105	0	1.29/2.42	0.533	0	
1996.3.22	4.6/4.0	1.15	1	8.8/40.3	0.22	0	4/1.7	2.35	1	
1996.4.9	5.1/3.4	1.5	1	5.8/32.4	0.18	0	3.4/1.2	2.83	1	停电
1996.4.12	28.5/14	2.04	1	23.3/105.2	0.222	0	14/4	3.5	2	送电
1996.4.14	31.2/16.3	1.91	1	16.9/101.4	0.167	0	16.3/2	8.15	2	
1996.4.15	38.3/19.9	1.92	1	20.4/152.3	0.134	0	19.9/2.4	8.29	2	
1996.4.16	38.6/18.5	2.09	1	16.6/130.5	0.127	0	18.5/3.6	5.14	2	
1996.4.17	36/26.6	1.35	1	26/128	0.203	0	26.6/3.5	7.6	2	

1,0,0,按照《导则》规定中的“三比值”法无对应的编码组,而总烃含量中的甲烷、乙烯及乙炔无增长趋势,同时按《导则》列出的不同故障类型产生的气体组合也无对应,但总烃含量小于 150 μ L/L,低于“注意值”。由此看来这是无故障阶段(或是有故障时的潜伏阶段)。

第二阶段(1995 年 11 月 15 日到 1996 年 4 月 9 日)是在第一次停电之后恢复送电,“三比值”的编码为 1,0,1~2,乙炔含量跃升一个数量级(由小于 1 μ L/L 升到约 5 μ L/L),氢上升了一倍。而甲烷和乙烯含量基本不变。由于特征气体组分中乙炔和氢为主要成分,因此可判断为油中火花放电(不同电位的不同连接点间,悬浮电位的连续火花放电,固体绝缘材料之间的油击穿等)。

第三阶段(1996 年 4 月 12 日到 1996 年 4 月 17 日)是在第二次停电之后恢复送电,“三比值”的编码为 1,0,2, 仅仅 5 天乙炔又跃升一个数量级(由约 5 μ L/L 上升到约 40 μ L/L), 氢上升至约 150 μ L/L。除乙炔外,甲烷、乙烯等均有所增长,与第二阶段相比,仍属油中火花放电范围,但放电强度较大。

退出运行后,于 1996 年 6 月返厂对此变压器进行解体检查:拆去上铁轭,拔出高压绕组,在低压绕组的外径侧中部的导油隔板上有一段铁屑,在铁屑的两端导油隔板(绝缘纸板)上有黑色放电痕迹,低压绕组表面正常,在低压绕组外径侧第一层纸筒表面与铁屑对应处也有黑色放电痕迹。这说明这个金属悬浮物在运行中高电场下引起尖端放电,因而在放电点周围的油被火花放电分解并产生乙炔和氢。

经清除金属屑并修复和更换了被放电损伤的绝缘部件,又经过器身干燥和绝缘处理后,工厂试验合格,投入运行后数年来油中色谱监视一直正常。

【例 5】某电厂一台 SFP3-240000/220 变压器,运行数年来在油色谱监测中一直很正常,总烃含量维持在 40 μ L/L 以下,其中的乙炔含量在 1 μ L/L 以下。但油中的一氧化碳和二氧化碳的数值都达到了 1 500 μ L/L 和 3 000 μ L/L(见表 30-20)。

表 30-20 SFP3-240000/220 变压器油色谱分析数据								μ L/L
分析时间	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂
1990.1.8	7.3	1 368	2 850	21.2	3.3	13.7	0.8	39
1990.3.6	107	1 496	3 320	21.5	4.1	13.5	0.8	39.9
1990.5.19	16.4	1 544	3 141	21.3	3.5	13.6	1.0	39.4

在 1990 年 5 月间对该变压器进行了标准项目的大修,吊开钟罩即发现低压侧(15.75kV)的一路引出线(分两路引出,每支路的相电流 2 540A)至汇流铜排间有一段绝缘焦黑痕迹,而夹持此引线的木支架亦被这种缓慢过热烧成炭状,剩下的引线绝缘亦成黑色焦脆片状物(见图 30-11 和图 30-12)。

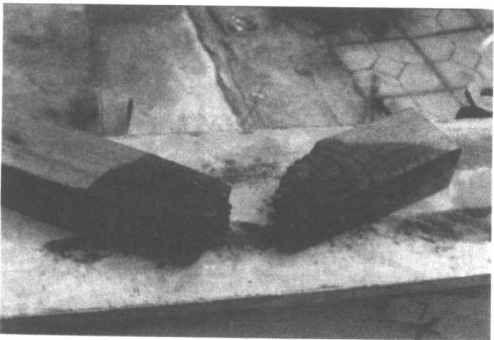


图 30-11 夹持引线的木支架烧成炭状



图 30-12 从过热引线剩下的炭状绝缘

故障后经分析认为是此引线距离其夹持木支架用固定角钢太小(仅 20mm),致使在大电流周围的强漏磁场通过此角钢的角部集中闭合并产生慢性的局部过热,经历了 5 年后使木支架烧成炭状(相连的角钢的角部亦有变色痕迹)。

此后,经工厂派人把原来的角钢割掉,重新焊上了足够距离的低磁钢支持件(为板状,距离达 100mm),使此问题得到妥善解决。运行数年来油色谱监视数据一直很正常。

【例 6】某电厂一台 SFP3-240000/220 变压器,自 20 世纪 80 年代投运后的 10 余年来,油的色谱监测中总烃含量一直维持在 100 μ L/L 以下,乙炔含量为零。但油中的一氧化碳和二氧化碳的含量却一直在逐年增长且速度还比较快,一氧化碳含量由数百 μ L/L 增长到 1 300 μ L/L,而二氧化碳含量也由 1 000 μ L/L 左右增长到 40 000 μ L/L 左右(见表 30-21)。

表 30-21 SFP3-240000/220 变压器油中色谱监测数据

分析时间	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	μ L/L C ₁ +C ₂
1992.4.25	24	1 589	26 395	27.8	24.4	30	0	82.2
1992.5.19	33.9	2 412	47 201	36.5	31.5	39.3	0	107.3
1992.6.11	694	2 251	75 801	26.4	48.2	376	326	776.6

由于在《导则》的规定中对一氧化碳和二氧化碳含量的增长数值并无明确的判据,所以认为此变压器运行情况很好。以致在 1992 年 6 月 11 日的正常运行中突发事故。经在现场吊开钟罩后,发现 a 相(低压绕组 1)的纵向油道中有飞出的焦糊纸片,初步断定是低压绕组 1 出现了故障。此后将此变压器运至较近的变压器检修厂进行彻底解体检查,结果发现:低压绕组 1 的上部线段已构成了匝间短路,导线有多根崩断支出,匝绝缘亦有大量烧黑损坏,又经仔细检查此绕组(也检查了其他各低压绕组)发现线段间的 1.5mm 油道完全堵塞,而 6mm 的油道也仅有 1mm~2mm 的距离。绕组的绝缘已有大量呈现黑色焦炭状(见图 30-13 和图 30-14),端部各线段尤为严重。

此台变压器的结构状况是:绕组排列为高₂低₂低₁高₁。低压绕组是用不自粘的换位导线绕制,由于其换位节距大(达 80mm~100mm),编织后不够紧密,而其绕包的匝绝缘也必然较松。于是在接近满载(达 90%)的运行中,在各线段间横向油道堵塞和减小的情况下形成热不能平衡(即绕组发生的热不能被油冷却散出),使绕组的绝缘严重焦糊而突然发生匝间短路事故,这种不自粘的换位导线是造成事故的根本原因。

事故发生并解体变压器后,此问题已经引起运行部门和制造厂的重视,并就此问题进行了专门的统计分析和研究工作,认为一氧化碳和二氧化碳都增长到某一判据数值时,应引起足够注意,并应在国标《导则》中予以规定。

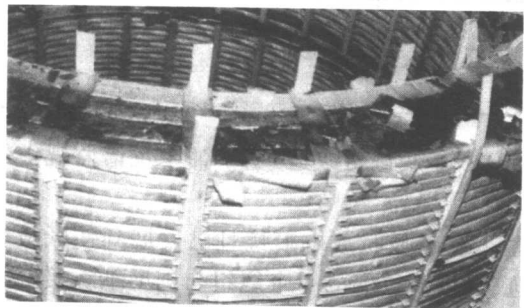


图 30-13 取掉损坏的部分绕组后,可直观地见到绕包匝绝缘的焦糊情况

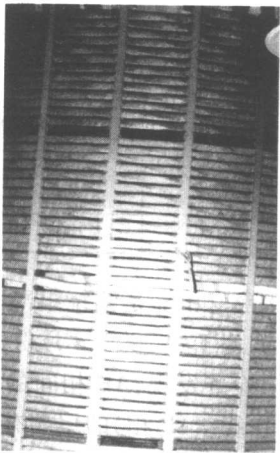


图 30-14 正视绕组时,线段间油道堵塞情况,上部发黑

鉴于此台变压器的低压绕组状况,恢复时三相的低压绕组(共六个)均用普通导线进行绕制。现此变压器运行数年来一直正常。

【例 7】某电厂一台 SFP3-260000/220 变压器,其结构型式、技术参数等基本与例 6 相似,而其也是运行了近 10 年,负载状况亦为 80%~90%。近 10 年来的油色谱分析数据摘记于表 30-22 中。

表 30-22 SFP3-260000 变压器油色谱分析数据 μL/L

分析时间	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂
1990.7.21	29	1 516	11 195	20.1	7.1	29.8	痕	57
1991.6.11	71.3	1 797	13 525	12.7	5.6	19.1	痕	37.4
1991.8.27	51	1 545	11 376	12.5	5.4	20	痕	37.9
1992.9.22	34.4	1 763	13 111	11.8	4.2	14.1	痕	30.1

其油中的一氧化碳和二氧化碳的变化规律与例 6 中表 30-21 有相似处。为吸收例 6 的事故教训,就在有准备的情况下对此变压器进行了解体,结果发现其所有的低压绕组横向段间油道有的完全堵死,有的则很小,经撬开线段后发现绕组已呈黑色且取下皆为酥脆状,见图 30-15 和图 30-16。可见情况与例 6 的事故变压器完全一致。由于解体前对负载的安排和机组的倒动,及时地对此台变压器进行解体检查和更新改造,避免了重大设备事故的发生。

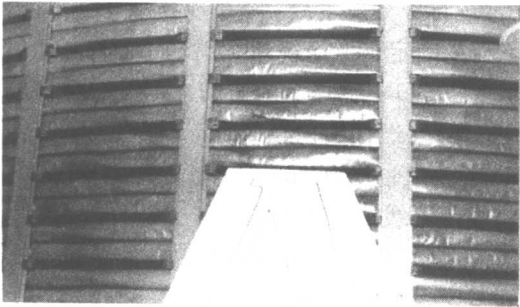


图 30-15 低压绕组的段间油道的堵塞和变小的情况

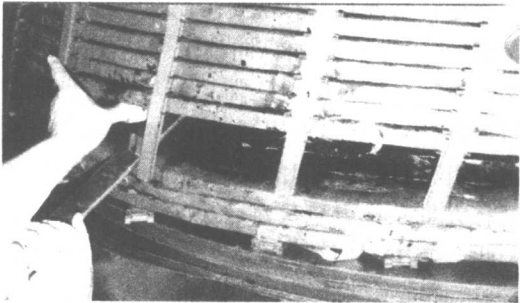


图 30-16 经撬开线段后,导线绕包匝绝缘的黑色焦脆情况

【例 8】某变电站一台 SFPL-80000/220 变压器,自 1987 年后数年来油的色谱分析数据一直很正常,总烃含量在 90μL/L 左右,乙炔值为痕量,但到 1990 年 6 月 19 日的油色谱分析中发现氢和一氧化碳和二氧化碳都有较大增长,而乙炔含量则增长到 1.5μL/L。到 1990 年 7 月 10 日总烃含量增长到 111.1μL/L,其中的乙炔则突增到 11μL/L(见表 30-23)。

表 30-23 SFPL-80000 变压器油中色谱分析数据 μL/L

分析时间	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂
1990.6.19	40	1 148	14 725	31	18	42	1.5	92.5
1990.7.10	68	1 200	13 164	34	19.1	47	11	111.1

由于此台变压器是铝绕组薄匝绝缘,现场计划在 1990 年底进行改造,鉴于油中色谱监视中的不正常,就被迫于 1990 年 8 月份提前更新改造。

经解体检查发现:AB 相间的围屏纸板的长垫块附近有树枝状放电痕迹且已发展到使纸板多处鼓泡,而在绕组(B 相)的尾端有纸板穿孔的放电痕迹(是因为尾端的一个绕组与围屏纸板接触所致),其放电的情况如图 30-17 和图 30-18 所示。

经过更新改造后,特别是把支撑围屏的长垫块移至低电位处,使此问题获得解决。现此台变压



图 30-17 检查时撕开鼓泡可见放电的沟道

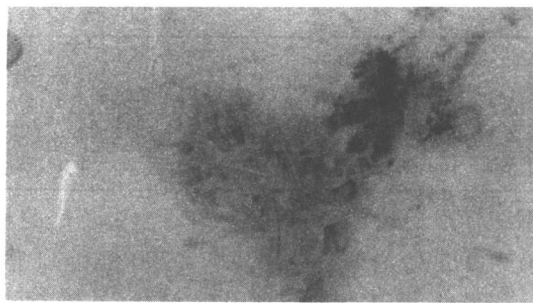


图 30-18 在绕组的尾部见到绕组导线与围屏接触时的放电点

器正在电网运行中,情况正常。

【例 9】某变电站一台 SFPS-120000/220 变压器,运行至 1989 年 8 月油色谱监测中发现异常,其总烃含量由 $6.55\mu\text{L/L}$ 剧增至 $647\mu\text{L/L}$,乙炔由 $0.3\mu\text{L/L}$ 增长到 $1.0\mu\text{L/L}$,其主要成分是甲烷和乙烯,这说明存在有 700°C 以上的高温范围的过热故障。至 1990 年初总烃含量已达到 $1300\mu\text{L/L}$ 。于是被迫停运进行检查,发现是有一台潜油泵由于运行维护不当,出现了潜油泵轴心偏移,使其铜叶轮严重磨损(经拆下与正常潜油泵叶轮相比较,质量上相差了 250g),这些被磨下的铜沫散落于油中,虽乙炔含量有所增加但速度较慢,经多次注油脱气仍未能见效(见表 30-24)。

表 30-24 SFPS-120000 变压器油色谱分析数据

分析时间	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	C_1+C_2
1989.7.20	18.4	95	853	2.6	2.2	1.45	0.3	6.55
1989.8.24	43.2	236	2 073	189	101	354	1.0	645
1990.1.10	62.4	42.3	499	411	185	712	痕	1 308

但由于自 1989 年 8 月 24 日起乙炔含量有上长趋势。此后经再次注油亦未见成效。于是在 1990 年 5 月份对它进行了解体检査,拆开外围屏纸板后发现各相间的纸板上均出现了自支撑围屏长垫块处的放电花纹(见图 30-19)。经将各相间距离最短的 4 个长垫块用手锯割短(使其不与围屏纸板接触)并更换了新的围屏纸板(各相间各更换了一张),再次投运后经 2~3 年,乙炔含量再也未出现过增长。但总烃含量仍达 $300\mu\text{L/L}\sim 400\mu\text{L/L}$,分析是在磁回路中仍有热故障存在,待安排后返厂大修。

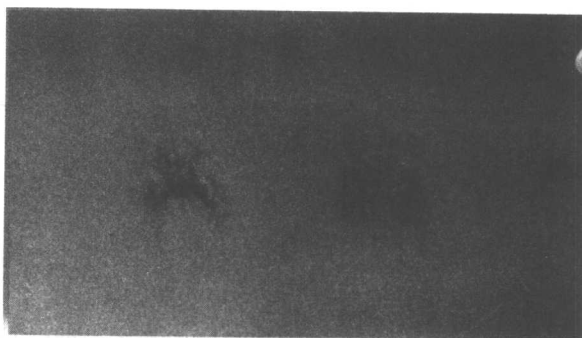


图 30-19 长垫块支撑处围屏纸板的放电情形

【例 10】某热电厂 2 号化水变压器,在运行中 1993 年 3 月 21 日气体继电器动作,取油样进行色谱分析结果如表 30-25 所示(为便于分析问题,把故障前后的色谱分析结果同时列入表中)。

根据 1993 年 3 月 21 日的色谱分析结果,用“三比值”法进行判断,得: $\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4} : \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} : \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6} = \frac{157.3}{15622.5} : \frac{7279.4}{2571.7} : \frac{15622.5}{1862.5} = 0.01:2.84:8.39$,经查《判断导则》编码为 0,2,2,属高于 700°C 的热故障。

由上述的判断数据可得出如下结论:2 号化水变压器油中总烃和产气速率均严重超标。在电力

表 30-25 2 号化水变压器油色谱分析数据

 $\mu\text{L/L}$

序号	分析日期	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂	注意值
1	1992.10.2	30.7	123.8	2 623.8	65	5.7	9.3	痕	80	C ₂ H ₂ ≤5
2	1993.3.21	2 571.7	125.2	2 852.6	7 279.4	1 862.5	15 622.5	157.3	24 921.7	C ₁ +C ₂ ≤150
3	1994.4.2	0	1.9	263.0	2.8	2.7	8.9	痕	14.4	H ₂ ≤150

系统标准中规定,隔膜式变压器油中总烃的相对产气速率的注意值为 10%,绝对产气速率的注意值为 0.5mL/h,两者分别超标 2 790 倍和 11 倍。

另外,上述判据与利用“三比值”法判断的结果相比较,两者判断结果一致,证明判断准确。

因此,可以得出 2 号化水变压器有过热、放电现象,并且可能还涉及到绝缘问题的结论。当结合变压器内部结构状况,可以推断,由涡流引起的铜过热或接触不良的可能性很大。

在 1993 年 3 月 21 日对 2 号化水变压器紧急停运,吊心进行检查发现绕组引出线套管的铜螺栓松动,螺栓变黑有过热和放电现象,这说明以上判断准确属实。经过检查处理并换油后,投运正常(色谱分析结果见表 30-25)。

【例 11】某热电厂 4 号主变压器,在 1995 年 4 月 21 日,发现 4 号主变压器色谱总烃上升,油温度也由 34℃上升到 54℃,在其前后的油色谱分析数据如表 30-26 所示。

表 30-26 4 号主变油色谱分析数据

 $\mu\text{L/L}$

序号	分析日期	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₁ +C ₂
1	1995.4.20	7.0	451	1 082	27	6	4	0	37
2	1995.4.24	13	651.2	1 941.6	52.7	3.1	42.3	0	98.1
3	1995.4.26	13.9	688.3	1 843.6	53.6	3.1	42.6	0	99.3
4	1995.5.2	7.0	504.5	1 934.7	47.4	4.6	39	痕	91.0
5	1995.5.11	12.3	534	2 287.4	59	6.7	41	0	106.7
6	1995.6.22	25.5	122.4	3 032.7	59.6	8.3	63.5	0	131.4
7	1995.7.28	19.4	624.4	3 083.9	67.3	13.2	68.7	0	149.2
8	1995.8.21	20.9	600.0	2 764.3	93.5	10.0	55.2	-	158.7
9	1995.11.30	10.7	149.9	892.4	4.5	1.4	13.6	0	19.5

利用“三比值”法进行判定:

$$\frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4} : \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} : \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6} = 0:4.05:13.65$$

查编码为 0,2,2,属高于 700℃的高温过热故障。

从气体的组成上看,总烃值为 98.1 $\mu\text{L/L}$,其中的甲烷和乙烯占主导成分(占 96.83%)。而氢含量都比甲烷、乙烯少,这说明故障的最大可能性是油过热。从当时的油温也可看出:1995 年 4 月 20 日为 34℃,4 月 24 日为 54℃,这说明不存在电路的绝缘故障。经过跟踪发现,其产气速率逐渐降低(见表 30-27)。

从表 30-27 看到,4 月 26 日的产气速率已降到 22%。虽然超过 10%的标准,但比 4 月 24 日的产气速率降低了很多,说明故障已不再发展。总烃含量虽有逐渐升高趋势,这是油过热故障所产生

表 30-27 4 号主变相对产气率

分析日期	1995.4.20	1995.4.24	1995.4.26	1995.5.11	1995.5.22	1995.6.6	1995.8.11
总烃含量/ $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$	37.0	98.1	99.6	106.7	120.7	134.3	148.7
相对产气速率/%	-	1 238	22	14	35	24	5

的气体在油中溶解不均匀造成的,需经过较长的时间循环才能均匀。

在对 4 号主变大修吊心检查中发现,4 号主变底部的固定螺栓有放电现象,螺栓所对应的两端呈黑色。此后经过处理并对油进行脱气后投入运行,色谱监测正常。

【例 12】某 500kV 换流站 A 相变压器于 1989 年投运,在近 12 年一直是低负载运行。1998 年 9 月进行额定负载试验,油中气体均很正常。1998 年 12 月的常规检测中首次发现油中有乙炔,含量为 $5.5\mu\text{L/L}$,在跟踪检测中,乙炔含量有减少趋势,1999 年 2 月降至 $0.4\mu\text{L/L}$,但在 2000 年 4 月 8 日又增至 $10.2\mu\text{L/L}$,此后又减少,2000 年 12 月 5 日其含量又降至 $3.8\mu\text{L/L}$ 。在 2001 年 1 月 17 日,又发现乙炔含量增至 $6.6\mu\text{L/L}$,2 月 12 日其含量迅速增长到 $72.4\mu\text{L/L}$,产气速率高达 $7.2\mu\text{L/h}$ 。远超过国标中规定的注意值 $0.5\mu\text{L/h}$ 。按三比值法判断,变压器内部有低能量放电故障。该变压器历次油中气体分析的典型数据及特征气体变化曲线如表 30-28 和图 30-20 所示。

表 30-28 历次油中色谱分析典型数据

分析日期	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	CO	CO	$\mu\text{L/L}$ C_1+C_2
1998.9.26	3	10	2	3	0	563	5 650	15
1998.12.6	18	11	2	5	5.5	530	3 798	23.5
1999.6.28	14	14	2	3	3.2	746	5 193	22.2
1999.11.30	9	16	1	3	0.4	764	4 894	20.4
2000.4.18	30	18	2	3	6.5	748	4 571	29.5
2000.4.25	45	18	3	3	10.2	738	5 253	34.2
2000.5.12	47	20.2	3.5	3.5	9.1	856	4 989	36.3
2000.10.19	29.5	24	3.8	5.7	5.3	780	5 436	38.8
2000.12.05	28	25.5	4.3	5.5	3.8	843	6 103	39.1
2001.1.17	17	8	2.9	4.6	6.6	155	2 611	22.1
2001.2.16	253	31.5	16.1	5.9	72.4	193	3 546	125.9
2001.3.1	211	20	15	7	72	174	3 181	114
2001.3.10	216	21	16	7	75	223	4 122	119
2001.3.27	222	22.3	16.1	6.3	60.4	218	3 653	105.1
2001.4.12	0	1.8	3.9	2.6	10.5	11	660	18.8
2001.4.17	10	3	5	3	19	14	1 008	30
2001.4.25	11	4	5	3	23	31	1 422	35
2001.5.5	24	4	5	3	25	41	1 525	37
2001.5.8a	197	13	3	3	102	54	1 790	121
2001.5.8p	210	15	4	16	119	55	1 866	154
2001.7.15	0	1	1	0	7	21	578	9
2001.7.26	1	2	2	0	13	91	1 154	17
2001.8.2	3	2	2	0	14	119	1 941	18
2001.8.16	4	3	3	0	15	193	2 133	21
2001.8.30	5	4	3	0	16	287	2 554	23
2001.10.12	0	0.5	0.3	0	1.3	5	241	2.1
2001.10.23	0	1	0.5	0	4	67	1 227	5.5
2001.10.30	0	1	1	0	5	90	1 478	7
2001.11.12	1.1	1.5	1	0	4.2	113	1 391	6.7
2001.12.4	0	1.8	0.9	0	3.3	126	1 146	6

在现场的检查、测试及所采取的措施:为查明乙炔的增长原因,在 2001 年 1 月至 9 月 17 日间,对该变压器进行了检查,试验和油的色谱分析,结果如下。

(1)一般性的试验、检查:对铁心及夹件绝缘测试、油泵及油流指示器检查、油流带电测量以及

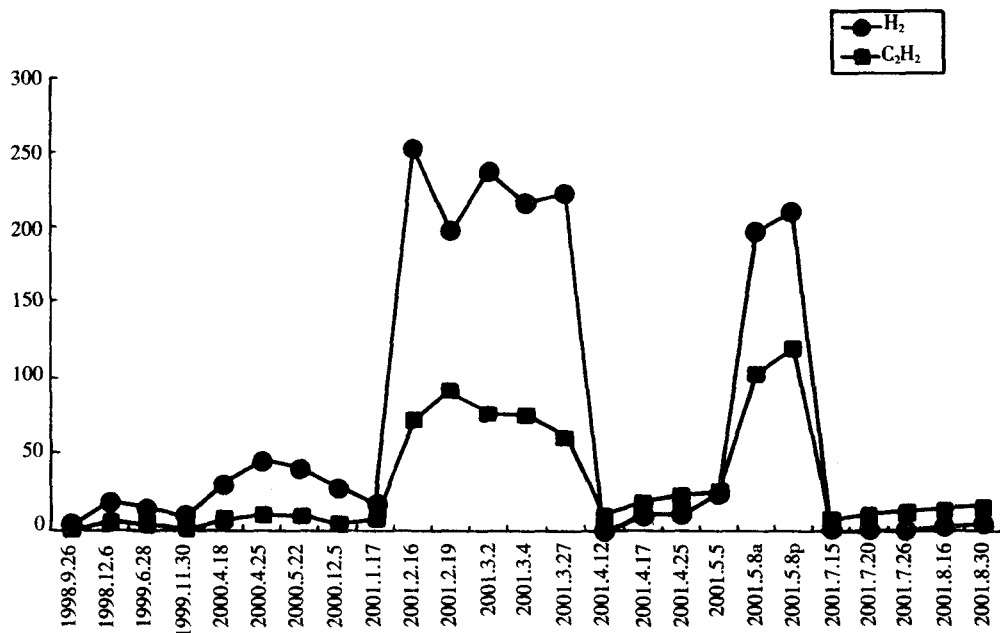


图 30-20 换流站 A 相变压器 C₂H₂、H₂ 变化曲线图

在高压中性点施加 40kV 交流电压下进行超声监听等项目的测试和检查,均未见异常。

(2)全电压下空载运行检查:投运 24h,超声未见明显放电声响。投运前后的油色谱分析结果如表 30-29。

表 30-29 空载前后油色谱分析结果

分析时间	部位	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
空载前	上	225	190	3 287	8	16	16	79
	中	208	180	3 254	8	16	16	76
	下	220	193	3 269	9	17	17	78
空载后	上	238	206	3 540	22	8	16	81
	中	240	204	3 427	22	7	17	76
	下	236	209	3 579	22	8	16	80

(3)带负载运行检查:变压器带 6 万 kW 负载,用超声监测。并在负载时进行油色谱分析(见表 30-30)。超声 8 个测点分布于变压器四周(见图 30-21),在变压器正面的 1* 位置处(BBC 标示牌附近)曾听到短暂的“吱吱”声响,仪器电平表大幅度摆动。

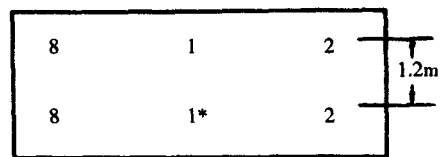


图 30-21 变压器正面测点位置(交流侧)

(4)加大负载运行检查:为确认乙炔增长与负载的相关性,将该变压器的负载分阶段的由 6 万 kW、12 万 kW、18 万 kW 递增,每阶段持续 6 天,确认油色谱无异常后再增大负载。在此期间每 3 天色谱分析 1 次,每 6 天用超声仪监听 1 次内部声响情况。结果是:乙炔含量随负载增长趋于稳定,超声监测无异常。

(5)对油过滤脱气后再投运:投运前油中乙炔含量为 10.8μL/L,运行 15 天后为 17μL/L~22μL/L。

(6)停电进行内部检查:经检查有载分接开关箱无渗漏现象,选择开关触头接触情况正常,切换开关的过渡时间及过渡电阻的检查测量无异常、对油箱壁和铁心等所有磁屏蔽固定夹或螺钉进行

表 30-30 负载后油色谱分析结果

 $\mu\text{L/L}$

分析时间	部位	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
负载 18h	上	215	183	3 201	21	7	16	75
	中	221	188	3 241	22	7	17	77
	下	217	181	3 211	21	7	17	76
负载 48h	上	215	183	3 202	21	7	16	75
	中	211	188	3 241	22	7	17	77
	下	217	181	3 211	21	7	17	76
负载 72h	上	197	192	3 449	22	8	17	77
	中	209	254	3 751	25	8	19	84
	下	210	250	3 740	24	8	18	83
负载 96h	上	172	142	2 922	17	6	14	70
	中	210	175	3 234	20	7	15	75
	下	212	174	3 181	20	7	15	75

检查,未发现松动或过热现象,检查铁心接地片无松动和放电烧伤情况,检查铁心无位移和过热现象。

(7)局部放电试验:采用在阀侧 Y 绕组上对称加压,在 1.0 倍额定电压下进行试验,并在四周箱壁上进行超声监测,结果均未见异常。

(8)变压器继续投入空载及负载运行:在运行中除乙炔含量增长及 2 月 27 日捕捉到一次超声信号外,未发现其他故障迹象。在运行中连续超声监测结果是:在投入空载后 5h 内于该变正面的 8 号测点位置(见图 30-21),共监听到 28 次内部声响(数值见表 30-31),而在运行中的超声检测的波形如图 30-22 所示。

表 30-31 空载 5 小时内监听到的声响情况

时间	分接位置	声响速度/dB	时间	分接位置	声响速度/dB	时间	分接位置	声响速度/dB	时间	分接位置	声响速度/dB
13:05	1	>20	13:57	1	6~8	16:14	1	16	16:57	1	16
13:07	1	>20	13:58	1	6~8	16:24	1	16	16:59	4	16
13:27	1	14~16	13:58	1	10~12	16:28	1	8	16:59	4	16
13:35	1	16~18	14:04	1	6	16:39	1	16	17:00	4	10
13:39	1	4~6	14:06	1	6	16:46	1	16	17:11	4	6~8
13:45	1	12~14	15:42	1	12~14	16:54	1	16	17:19	4	19
13:56	1	14	15:49	1	14~16	16:56	1	16	17:28	4	14~16

对超声测试结果的分析:从记录的超声信号和超声波形表明,内部在交流侧 1.1 套管区域有断续的悬浮放电,由于箱壁装有磁屏蔽,对超声检测有一定影响,使定位的计算复杂,不能给出确切定位。

(9)对上述各项试验、检查的小结:经分析确认该变压器内部存在悬浮放电,但故障不在主回路。由于现场不具开盖检查的条件,同时还考虑到总体供电,于是采取每天测取色谱数据并注意其产气率的变化等的监控运行方式,经 30 余天的追踪监视,未发现异常。

最终故障部位的确定和处理:2001 年 9 月 17 日,该变交流侧 1.1 套管外瓷套爆炸(是套管本身故障),经分析与该变前段时间内部故障现象无关。在恢复性抢修过程中,发现 500kV 套管的穿缆引线上有一放电烧伤痕迹,且有游离碳及烧焦的纸片,经仔细检查系 1.1 绕组 500kV 出线屏蔽管等电位引线断开,致使高压引线屏蔽管悬浮,产生间歇性放电,使油中乙炔含量增加,并出现间歇性的

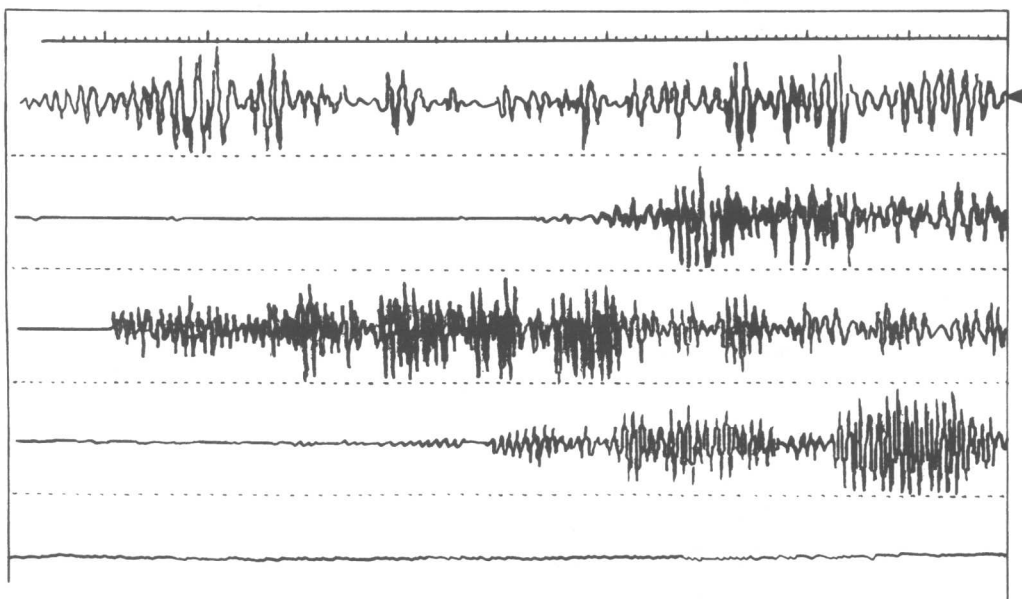


图 30-22 内部放电超声波形图

超声放电信号。

借助此次更换套管,将穿缆引线裸露处进行绝缘处理,对连接屏蔽的小引线作了相应加长。在 2001 年 10 月 11 日对该变进行局放试验,局放量符合标准要求,同时监听的超声仪未收到任何信号。

投入运行后,乙炔含量稳定在 $5.0\mu\text{L/L}$ 以下,这是纸中残存气体与油平衡过程的现象,其后乙炔含量逐步降低,说明内部故障已经消除,而无故障了。

以上 22 例均系电网运行多年的实践的部分事例汇总,有一定的代表性,虽然在电力变压器色谱五花八门,与上述各例难以相同,但基本的分析原则相似,可以作为变压器的运行故障色谱分析的参考。

第三十一章 高压直流换流变压器试验

第一节 概 述

高压直流输变电具有许多独特的优点,高压直流输变电系统在世界上应用日益增多。而我国自20世纪80年代以来,高压直流输变电技术也得到了迅速的发展,尤其是90年代以后,我国不仅对高压直流输变电技术和高压直流换流变压器试验技术进行了系统的研究,而且先后建设了近10条 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电系统。与此同时,根据国家高压直流输变电工程的需要,国内有关企业与国外企业合作已陆续研制生产了10多台 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流换流变压器。今后,根据国家“十一五”及至2020年的发展规划,我国将拟建20多条 $\pm 500\text{kV}$ 及以上高压直流输变电系统。随着高压直流输变电系统的建设,高压直流换流变压器也将大量生产,其试验技术也将随之发展。

第二节 换流变压器的工作原理和结构特点

高压直流换流变压器是高压直流输变电系统的主要设备之一,换流变压器的作用是与整流器配合将交流高电压转换为直流高电压或者将直流高电压逆变成交流高电压。为了提高整流效率和减小纹波分量,整流系统通常是由两个6脉动换流桥组成,每个6脉动换流桥就要有二组阀侧绕组,一组为Y结;另一组为D结。这样对于每个换流桥的换流变压器就有三种方式可以选择:

- (1)2台三相双绕组换流变压器(一台YY结线,另一台YD结线);
- (2)3台单相三绕组换流变压器(每台都有一个YY结线和一个YD结线);
- (3)6台单相双绕组换流变压器(其中三台为YY结线,另三台为YD结线)。

上述三种方式如图31-1所示。

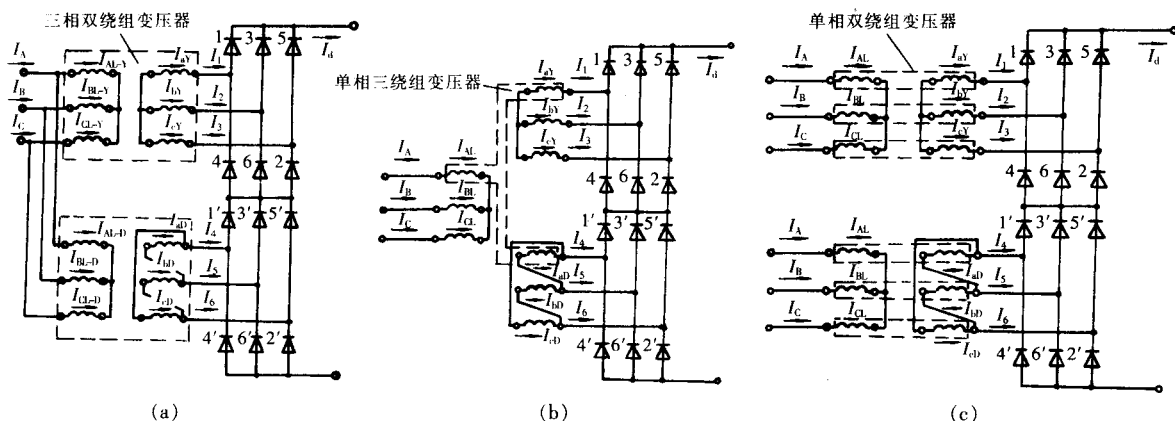


图 31-1 换流变压器结构及接线方式

(a)2台三相双绕组换流变压器 (b)3台单相三绕组换流变压器 (c)6台单相双绕组换流变压器

对于高压大容量换流变压器通常选择单相的方式,如图31-1中的(b)、(c)所示。

从本质上说,换流变压器基本原理仍然与交流电力变压器相同,但由于它在运行中,阀侧绕组

既要承受交流高电压的作用,也要承受直流高电压的作用,因而换流变压器又与交流变压器工作状态存在许多差异。首先,它的绝缘配合既要满足交流高电压所必需的绝缘配合,同时又要满足直流高电压下的绝缘配合,还要满足交、直流复合电场绝缘要求。其次,由于整流阀站通常是6脉动或12脉动整流,因而使换流变压器绕组内存在着多种谐波分量,而这些谐波分量必然会使换流变压器的附加损耗(谐波损耗)增加,并可能导致局部过热。第三,由于换流变压器在运行中,剩余直流电流会流过阀侧绕组,使变压器铁心处于偏磁磁化状态,因而存在着直流偏磁损耗。

本章只对换流变压器与普通电力变压器不同的试验项目和方法进行讨论,其他与电力变压器相同的试验项目见本书的有关章节。

第三节 换流变压器的试验项目及绝缘试验电压

换流变压器的国际标准是 IEC61378—2:2001《变流变压器 第二部分 高压直流输电用换流变压器》,相应的国家标准 2004 年已形成报批稿(GB/T18494.2—200×)。

1 换流变压器的试验项目和依据标准

IEC61378—2:2001 第 10 款规定了换流变压器的例行试验、型式试验和特殊试验项目。

1.1 例行试验

- (1)联结组(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.3);
- (2)电压比(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.3);
- (3)绕组电阻(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.2);
- (4)空载损耗和空载电流(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.5);
- (5)负载损耗和阻抗(主分接)(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.4);
- (6)油样(IEC60567:1992 和相应 GB 标准);
- (7)操作冲击试验(IEC60076—3:2000、GB1094.3—2003,15);
- (8)雷电冲击试验(IEC60076—3:2000、GB1094.3—2003,14);
- (9)包括局部放电测量和超声探测测量的外施直流电压耐受试验(IEC61378—2:2001、10.4.3);
- (10)包括局部放电测量的极性反转试验(IEC61378—2:2001、10.4.4);
- (11)外施交流电压耐受试验和局部放电测量(IEC61378—2:2001、10.4.5);
- (12)感应电压试验和局部放电测量(IEC60076—3:2000、GB1094.3—2003,12);
- (13)绝缘电阻测量;
- (14)铁心绝缘与相关绝缘的试验。

1.2 型式试验

- (1)温升试验(IEC60076—2:1993、GB1094.2—1996、IEC61378—2:2001、10.5);
- (2)声功率级(IEC60076—10:2001、GB1094.10—2003);
- (3)冷却设备的声功率级(IEC60076—10:2001、GB1094.10—2003)。

1.3 特殊试验

- (1)重复的冲击波(RSO)测量;
- (2)短路承受能力试验(IEC60076—5:2000、GB1094.5—2003);
- (3)损耗和阻抗(其他分接)(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.4、10.5。IEC61378—1:1997);
- (4)零序阻抗(IEC60076—1:1993、GB1094.1—1996,10.7);
- (5)负载电流试验(IEC61378—2:2001,10.6)。

2 换流变压器的绝缘试验电压

对于换流变压器的网侧绕组线端和中性点端的绝缘水平,与系统同等级的电力变压器相同,阀侧绕组的绝缘水平包括阀侧绕组对地的操作冲击水平、直流耐压水平、极性反转电压水平和交流外施耐受电压水平。

2.1 操作冲击水平

仅施加于绕组与地之间,根据系统的对地电压,按 GB1094.3—2003 规定。

2.2 直流耐压水平

试验电压应施加于阀侧绕组端子上,其耐受电压 U_{dc} 按下式计算(或根据合同要求):

$$U_{dc}=1.5[(N-0.5)U_{dm}+0.7U_{vm}] \quad (31-1)$$

直流耐压的极性为正极性。

2.3 极性反转电压水平

试验电压应施加于阀侧绕组的端子上,试验电压 U_{pr} 按下式计算:

$$U_{pr}=1.25[(N-0.5)U_{dc}+0.35U_{vm}] \quad (31-2)$$

2.4 外施交流电压耐受水平

试验电压应施加于阀侧绕组所有的端子上,试验电压 U_{ac} 按下式计算:

$$U_{ac}=\frac{1.5[(N-0.5)U_{dm}+\sqrt{2}U_{vm}/\sqrt{3}]}{\sqrt{2}} \quad (\text{方均根值}) \quad (31-3)$$

(31-1)~(31-3)式中:

N ——从直流线路的中性点至与变压器相连的整流桥间所串接的 6 脉波桥的数量;

U_{dm} ——每个阀桥的最高直流电压;

U_{vm} ——换流变压器阀侧绕组的最大相间交流工作电压。

第四节 换流变压器的试验原理和试验方法

换流变压器的运行状态和工作方式与普通交流电力变压器有许多差异,从而决定了换流变压器的试验项目和方法有许多不同,它除了具有普通电力变压器的一些试验项目外,还有许多与其不同的项目,有些相同的试验项目,其试验和计算方法也有所不同。

1 运行条件下负载损耗的测量和计算

对于一般电力变压器,仅测量额定工频条件下的负载损耗。但对于换流变压器,由于它在运行中流过其绕组的电流含有一定的谐波,因此在考虑换流变压器运行条件下的负载损耗时,必须考虑其谐波损耗。对此,IEC61378—2:2001 标准规定,为了确定运行条件的总损耗,要求进行两种损耗测量,一种测量应在额定频率下进行,另一种应在不低于 150Hz 的频率下进行。并根据这些测量进行下述计算:a.确定绕组内、外的附加杂散损耗的分布;b.确定运行中的负载损耗。

(1)首先在额定频率 f_1 、额定电流 I_1 下测量出负载损耗 P_1

$$P_1=RI_1^2+P_{WE1}+P_{SE1} \quad (31-4)$$

式中 RI_1^2 ——电阻损耗;

P_{WE1} 、 P_{SE1} ——分别为基波频率下绕组的涡流损耗和结构件(不包括绕组)中的杂散损耗。

(2)然后再在 $\geq 150\text{Hz}$ 的另外一个频率 f_x 、10%~50%额定电流 I_x 下测量该频率下的负载损耗 P_x

$$P_x=RI_x^2+(\frac{I_x}{I_1})^2(\frac{f_x}{f_1})^2P_{WE1}+(\frac{I_x}{I_1})^2(\frac{f_x}{f_1})^{0.8}P_{SE1} \quad (31-5)$$

用上述两个等式,可对两个损耗 P_{WE1} 、 P_{SE1} 进行估算。

(3)根据 IEC61378—2:2001 中 7.4 条规定的计算规则和用户给定的谐波频谱,可以确定实际运行中的总负载损耗 P_N

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times F_{WE} + P_{SE1} \times F_{SE} \quad (31-6)$$

式中 I_{LN} ——运行负载电流均方根值(25 为估计的最高谐波次数,实际谐波次数可由用户提供),

$$I_{LN} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} I_h^2};$$

$$F_{WE} \text{——涡流损耗附加系数, } F_{WE} = \sum_{h=1}^{25} K_h^2 \times h^2;$$

$$F_{SE} \text{——杂散损耗附加系数, } F_{SE} = \sum_{h=1}^{25} K_h^2 \times h^{0.8}。$$

$$K_h = \frac{I_h}{I_1}, \quad h = \frac{f_h}{f_1}$$

(4)运行时的总损耗=空载损耗+计算出的运行时的总负载损耗

如果用户要求考虑直流偏磁损耗,则应再加上用户提供的直流偏磁损耗的数值(通常直流偏磁损耗数值比较小,大约仅几千瓦到十几千瓦)。

测量可以采用功率分析仪进行(可参照电力变压器负载损耗测量,见本书相关章节)。

2 温升试验

试验按 IEC60076—2:1993 或 GB1094.2—1996 进行。但施加的损耗应按上述测量和计算出的总损耗,并在稳态条件下确定顶层油温升(如受设备限制,可适当降低施加的损耗,但不得低于规定值的 80%,并要校正到规定的损耗下的温升)。顶层油温升确定后,接着用与额定运行条件下的负载损耗等价的 50/60Hz 正弦试验电流继续进行试验,持续 1 小时,在此期间测量油和冷却介质温度。试验结束时测定绕组的温升。绕组温升测量采用降温曲线的方法,测定方法同电力变压器。

其等价的试验电流按 IEC61378—2:2001 中的 10.5 条规定的计算方法计算。即:

$$I_{ed} = I_1 \times \left(\frac{I_{LN}^2 R + F_{WE} \times P_{WE1} + F_{SE} \times P_{SE1}}{I_1^2 R + P_{WE1} + P_{SE1}} \right)^{0.5} \quad (31-7)$$

一般情况下,对于一台三绕组换流变压器,有两个具有相同容量的阀侧绕组,采用星—星接和星—角接。对此应采用三种施加电流的程序,如表 31-1 所示。

进行表中试验 B 和试验 C 时,一般来说,网侧绕组中的电流大约等于试验 A 时的一半,但试验 B 与试验 C 的损耗可能会有所不同,主要是由于谐波电流本身的差异造成的附加损耗上的差异,此时应分别计算每种情况的损耗附加系数 F_{WE} 和 F_{SE} 。并在此情况下施加每个绕组的等价试验电流,确定绕组的温升。

对于一台三绕组换流变压器,如果它的两个阀侧绕组的容量和对网侧绕组的阻抗相同,那么可以只试验 A。

温升试验的程序和方法及各部位温度的监测、油中的色谱分析与电力变压器相同,可参照本书有关章节。

另外,为了验证换流变压器的载流能力,对于不进行温升试验的换流变压器(不进行型式试验的换流变压器),应施加计算出的总运行损耗进行负载电流试验,试验持续时间不得少于 12h,试验时同时进行油中溶解气体的色谱分析,用以检测可能出现的过温和异常温度(如果该台换流变压器

表 31-1 三绕组换流变压器的试验条件

	网侧绕组	阀侧绕组 Y 接	阀侧绕组 D 接
试验 A	负载	负载	负载
试验 B	负载	负载	无负载
试验 C	负载	无负载	负载

已经进行了温升试验,则可不进行负载电流试验)。

负载试验和温升试验时对试验电源的要求和电容器的补偿同电力变压器的要求一样,但在 $\geq 150\text{Hz}$ 负载试验时,要考虑补偿电容器的过电流情况,电容器仅能承受 $U_{\text{额定}} \times \frac{f_{\text{额定}}}{f_{\text{试验}}}$ 的电压。

3 外施直流电压试验及局放测量

该试验是考核被试阀侧绕组对其他绕组和对地的直流绝缘强度和绝缘性能,在直流耐压的同时检测直流电压下的局放水平。

试验时,被试的换流变压器的油温应保持在 $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。直流电压选用正极性。试验前换流变压器的所有出线端子(套管端)均应至少接地 2h,同时不允许对换流变压器绝缘结构预先施加较低的电压。

试验接线:所有非被试绕组的出线端均牢固接地(或经过局放测量阻抗接地),被试绕组两端连接在一起接到直流电压发生器的输出端,应注意所有的高压端连线必须采用高压无晕引线连接,并保证其在试验电压下无可见和不可见电晕(以免影响局放测量)。试验接线如图 31-2 所示(以双绕组换流变压器为例)。

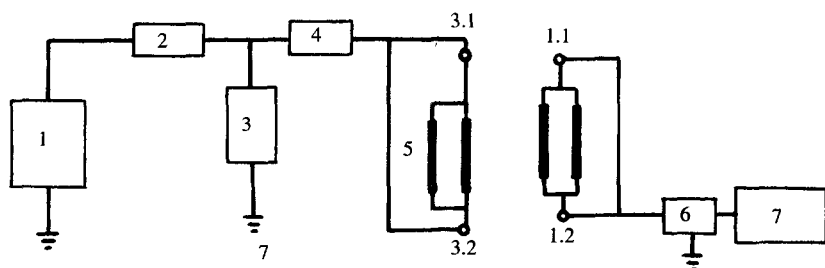


图 31-2 直流电压试验及局放测量线路

1—直流电压发生器 2、4—串联保护电阻 3—直流电阻分压器,测量直流电压用 5—试品(换流变压器) 6—局放测量接收阻抗 7—可用于直流局放(可记录脉冲次数)测量的数字局放仪
3.1、3.2—阀侧绕组出线端 1.1、1.2—网侧绕组出线端

试验时应在 1min 内将电压升至规定的试验电压,并在试验电压下保持 120min,此后电压应在 1min 内降低至零。

在整个外施直流耐压试验过程中,应进行局部放电测量。

对于直流电压下的局放测量,与电力变压器在交流电压下的局部放电测量在方法上有所不同,这是由直流电压下的局部放电的机理所决定的,直流电压下的局部放电是在比交流电压下高得多的场强下发展的,直流电压下气隙的击穿会引起电荷的重新分布,并且气隙上的电压急剧减小,而离子的流动决定于介质的电导,由于介质电导往往很小,所以气隙上的电压恢复得比较慢(几十秒、几分钟甚至十几分钟),因而局部放电通常是以单次脉冲的形式出现,出现的频次较低,但幅值则较高。在进行直流下的局部测量时,要测量在规定时间内大于规定脉冲幅值的脉冲次数,因此适用于直流电压下的局放测量装置应具备整定幅值的脉冲记数功能,目前国内外已有许多这类产品。也可采用带有脉冲记数功能的数字示波器进行测量。

在上面的试验线路中,是采用串联测量回路,校正方波应按串联校正方式,即校正方波施加于 3.1、3.2 与 1.1、1.2 之间。

也可采用并联测量回路,即利用阀侧绕组的出线套管作为并联电容分压器从套管的测量屏引出,接到局放接收阻抗,此时校正方波应施加在阀侧绕组与地之间,即图中的 3.1、3.2 与地之间。

IEC61378—2:2001 标准规定的验收准则:

“如果在试验的最后 30min 内,记录到 $\geq 2\,000\text{pC}$ 的脉冲数不超过 30 个,且试验的最后 10min 内,记录到 $\geq 2\,000\text{pC}$ 的脉冲数不超过 10 个,则应认为此试验通过验收,不需要继续进行局部放电试验。如果此条件未满足,则试验延长 30min。”

“延长 30min 的试验仅许进行一次,当在此 30min 内的脉冲数不超过 30 个,且在试验的最后 10min 内的脉冲数不超过 10 个,则应认为换流变压器试验合格。”

如果无故障发生,则应认为本试验是非破坏性的。当局部放电测量值不合格时,不应立即拒绝该试品,而应由用户与制造厂就进一步的调查和工作进行协商。

在试验中,最好同时使用能对局部放电进行探测和定位的检测装置和外部电晕检测仪,以便能够在试验中对换流变压器内部的局部放电和外部试验线路上的电晕放电进行区分。

对于升压和降压速度,与直流电压发生器的参数有关,应合理选择和设计直流电压发生器充电时间常数和放电时间常数(因通常直流电压发生器的主电容远大于试品电容,试品本身电容影响很小),以保证 1min 内完成升压或降压,试验结束时,电压应降至 30% 的试验电压以下时接地(有时往往是很困难的,但最少应降至 50% 的试验电压以下接地,以免对试品产生不利影响)。关于直流电压发生器,见本书有关附录。

直流耐压试验结束后,绝缘结构件中可能有很多的残余电荷,必须进行充分的放电,否则会对后续的局部放电测量有影响。通常的方法是将换流变压器的所有端子接地,一般不少于 8h。

4 极性反转试验及局部放电测量

该试验是考核被试阀侧绕组对其他绕组和对地的直流电压在快速转换极性时的绝缘性能。该试验是在直流耐压试验后并且试品经过充分放电的情况下进行的。

被试变压器的油的温度、状态及试验接线与外施直流耐压相同,局部放电的校正及测量方法也相同。

试验从负极性开始,试验程序如图 31-3 所示。

试验中要进行两次极性反转。试验从负极性开始,先施加负极性电压 90min,然后再施加正极性电压 90min,最后再施加负极性电压 45min,每次电压极性反转应在 2min 内完成(对于有些用户,可能会要求在 1min 内完成)。应在整个试验过程中监视局部放电水平。

在试验中,最好同时使用能对局部放电进行探测和定位的检测装置和外部电晕检测仪,以便能够在试验中对换流变压器内部的局部放电和外部试验线路上的电晕放电进行区分。

如果在每次极性反转后的 30min 内,记录到 $> 2\,000\text{pC}$ 的脉冲数不超过 30 个,且在每次反转后的最后 10min 内,记录到 $> 2\,000\text{pC}$ 的脉冲数不超过 10 个,则认为此试验结果通过验收。

在极性反转的过程中可能会由于直流设备的操作(如开关的分合、升压调压装置等)而在测量系统中产生脉冲干扰,此时不应进行局部放电的计数。

如果无故障发生,则应认为本试验是非破坏性的。当局部放电测量值不合格时,不应立即拒绝该试品,而应由用户与制造厂就进一步的调查和工作进行协商。

极性反转试验结束后,绝缘结构件中可能有很多的残余电荷,必须进行充分的放电,否则会对后续的局部放电测量有影响。通常的方法是将换流变压器的所有端子接地,充分地放电。最好 8h

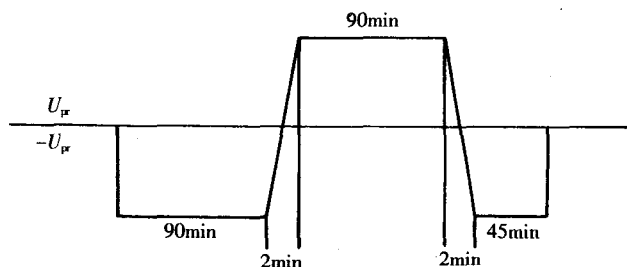


图 31-3 极性反转试验程序

以上,有时需要更长的时间。

5 外施交流电压耐受试验及局部放电测量

该试验是考核被试阀侧绕组对其他绕组和地的交流耐压强度和交流电压下的绝缘性能。

试验使用 50Hz 或 60Hz 的频率,被试绕组的所有端子连接在一起,接到试验设备上,所有非被试绕组应连接在一起并接地或通过局部放电阻抗接地。其他非被试端子(如铁心、夹件引出端)均应接地。

被试绕组的各出线端连接及同试验变压器的连接必须采用高压无晕引线,被试绕组的各出线端需要采取妥善的防晕措施,确保在试验电压下无可见电晕和不可见电晕。

试验接线如图 31-4 所示(以双绕组换流变压器为例)。

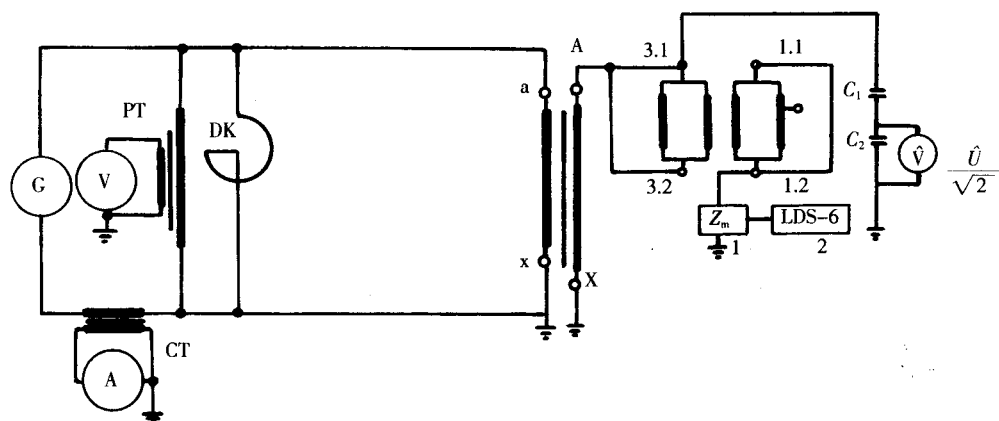


图 31-4 交流耐压试验及局放测量线路

G—发电机 DK—补偿电抗器 PT—电压互感器 CT—电流互感器 a、x 和 A、X—试验变压器的低压绕组和高压绕组 3.1 和 3.2—被试换流变压器的阀侧绕组出线端 1.1 和 1.2—被试换流变压器的网侧绕组出线端
 C_1 、 C_2 —测量电压用标准电容器的高、低压电容 Z_m —局放测量接收阻抗 LDS-6—局部放电检测仪

在上面的试验线路中,局放测量是采用串联测量回路,校正方波应按串联校正方式,即校正方波施加于 3.1、3.2 与 1.1、1.2 之间。也可采用并联测量回路,即利用阀侧绕组的出线套管作为并联电容分压器从套管的测量屏引出,接到局放接收阻抗,此时校正方波应施加在阀侧绕组与地之间,即图中的 3.1、3.2 与地之间。

局部放电测量也可采用串联法和并联法同时测量,这对可能出现的局部放电超过标准要求或超过合同要求时,对于故障部位的判断是有益处的,特别是阀侧绕组出线套管故障的判断是十分准确的。但两种方法在测量数值上会有少许差异,事先应同用户或试验监制方说明,认可其中一种测量结果作为试验结果。

试验持续时间为 1h,标准规定的局部放电的允许值为不超过 500pC,如果合同另有规定,应按合同规定的数值考核。

该试验通常试验电压比较高(特别是 Y 接的阀侧绕组),试验接线应在保证绝缘距离的前提下尽量减小试验回路的长度,这对于减小线路的干扰(特别是高频干扰)是有好处的。也可采用在高压回路中串接电感的方法来降低干扰。

试验时,最好采用能对局部放电进行探测和定位的检测装置和外部电晕检测仪,以便能够在试验中对换流变压器内部的局部放电和外部试验线路上的电晕放电进行区分,并采取措施消除试验线路上的电晕干扰。

如果局部放电测量结果超过了规定的数值,应采取 IEC60076—3:2000、GB1094.3—2003 标准附录 A 中所建议的措施。

在阀侧绕组外施交流耐压时,阀侧绕组的出线套管也承受着直流电压的作用,套管本身的局部放电水平也影响着换流变压器局部放电的检测结果,而目前的直流套管的检验标准一般是参照 IEEE 标准,该标准对套管在直流电压下的局部放电的验收标准是与换流变压器同一水平,这是极不合理的,由于套管和换流变压器在局部放电测量的回路不同,其测试灵敏度有明显的差异。套管的局部放电允许值至少应比变压器局部放电允许值低一个数量级甚至更低一些较为合理。

6 感应电压试验及局部放电测量

换流变压器的感应电压试验(包括局部放电测量)同电力变压器的感应电压试验(包括局部放电测量)在原理上、试验方法上基本相同,该试验可参照本书的第九章和第十一章。试验线路如图 31-5 所示。

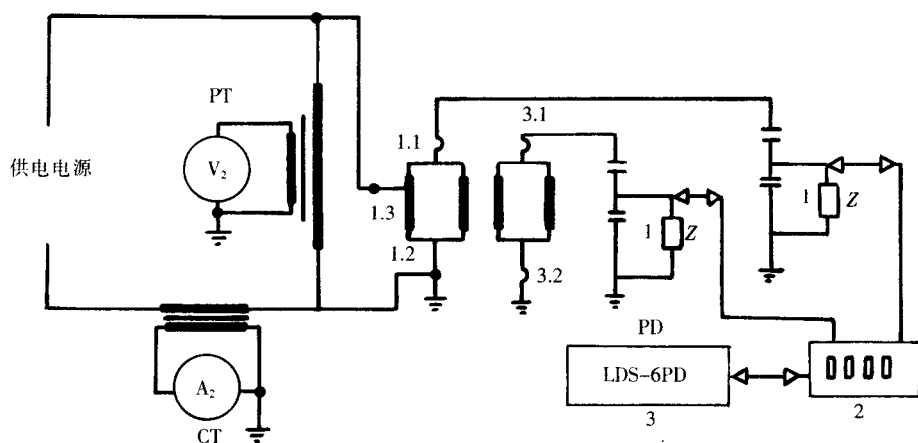


图 31-5 感应电压试验及局部放电测量线路

CT—电流互感器 PT—电压互感器

1—局部放电接收阻抗,接至 1.1 端和 3.1 端的套管的测量屏上 2—多通道局放信号转换器

3—局部放电检测仪 1.3—网侧绕组试验用抽头

对于换流变压器的感应电压试验,有两点需要说明:

一点是由于换流变压器的结构特点,它的网侧和阀侧电压等级都比较高,电压直接施加到绕组上,有时是很困难的,因此通常换流变压器在设计上在网侧绕组的一个线圈上留有一个专门供试验用的抽头,并安装了出线套管,当全部试验完成后,该套管拆除。感应电压试验(包括空载试验)是从该供试验的端子和地之间施加的。

另外一点是换流变压器的感应电压试验是在直流耐压和直流极性反转之后进行的,所以在换流变压器的绕组绝缘结构件中可能还存在较多的残余电荷(尽管充分接地,有时也难以完全消除),在感应电压试验中,如果发现经常出现有高幅值(超过 1 000pC 或超过 2 000pC)的单个脉冲出现,应考虑是残余电荷所导致的,此时,应对换流变压器进行一次预处理,方法是施加额定频率和 1.1 倍的额定空载电压 1h,可望消除和减少残余电荷。

实际上对于外施交流耐压试验,也存在直流试验后存在残余电荷的问题,由于外施交流电压试验时,整个被试绕组均处于高电位,而空载励磁对低场强部位的残余电荷无明显的消除作用,因而外施交流耐压前一般不采用空载励磁的方法消除残余电荷。

关于换流变压器的其他试验,与电力变压器试验相同,请参照本书有关章节。

第三十二章 电抗器试验

第一节 概 述

电抗器是电力系统中的重要设备之一,其用途广泛,种类繁多。按照GB10229—1988《电抗器》(等同IEC 289—1987《电抗器》)标准的规定,电抗器分为并联电抗器、限流电抗器和中性点接地电抗器、平波电抗器、阻尼电抗器、调谐电抗器(滤波电抗器)、接地变压器(中性点耦合器)、消弧线圈。另外,还有串联电抗器(JB5346—1998)和半导体电气传动用电抗器(JB96440—1999)。从电抗器结构分,有干式和油浸电抗器、空心电抗器和铁心电抗器等,从电气上有单相和三相电抗器。

由于电抗器的种类不同,其试验项目和试验方法也略有不同。另外,由于电抗器同属变压器类产品,所以多数试验项目和试验方法均与电力变压器相同。但由于电抗器具有不同于电力变压器的特殊性,所以有些试验项目的试验方法与电力变压器也稍有不同。现列出如下几项试验(详细内容参见相应电抗器标准)。

(1)感应耐压试验:当试验站的容量和电压达不到试验要求或本试验对试品会造成不切实际的热应力时,经供需双方协商,本试验可以用冲击试验代替,所施加的电压与其电压等级、耐压水平相同。

(2)损耗测量:使用电桥法较为有利,因电抗器功率因数很低,使用瓦特表法有可能产生较大的误差。另外,对不带铁心或不带磁屏蔽的电抗器,损耗可在任何电流下测量并校正到额定持续电流;对带铁心和磁屏蔽的电抗器,损耗中的各种分量不能在测量中区分开来,可在绕组平均温度近似等于参考温度时进行测量。容量较小的适用于瓦特表法(互感器角差应校正),较大的以电桥法为佳。

(3)短时电流试验:短时电流的第一个波的峰值应为其方均根值的 $1.8\sqrt{2}$ 倍,单相电抗器应通过 $2\text{次}0.5\text{s}\pm 0.05\text{s}$ 的额定短时电流;三相电抗器要在完全不对称的情况下对每相进行一次单相试验,再用近似相等的三相电流进行一次三相试验。

(4)温升试验:限流电抗器和中性点接地电抗器、阻尼电抗器、接地变压器(中性点耦合器)、消弧线圈要通过额定持续电流,对串联电抗器要通过额定频率的1.35倍额定电流;调谐电抗器(滤波电抗器)试验电流与总损耗相一致。

从试验角度看,以并联电抗器和平波电抗器的试验较为复杂,故本章仅将上述两种电抗器的试验单独列出,其他电抗器的试验可见相应的电抗器标准和本书相关章节。

第二节 并联电抗器试验

并联电抗器并联连接在交流系统中,用于补偿容性电流。并联电抗器是电力系统的主要设备之一,随着电力建设的发展,并联电抗器的电压等级不断提高,容量不断增大,目前国内已研制生产出750kV、100Mvar单相并联电抗器,1000kV电压等级、单相容量240Mvar~300Mvar并联电抗器的先期研制工作也已经展开。本章仅对高电压大容量并联电抗器(单相)所特有的试验进行讨论。而对于与电力变压器相同的试验项目,可见本书相关章节。

对于高电压大容量并联电抗器,通常都是油浸式,这主要是从温升和绝缘方面考虑的。

1 试验项目和标准

1.1 出厂试验

- (1)绕组电阻的测定:GB1094.1—1996第10.2条;
- (2)电抗测量:GB10229—1988第10.6条;
- (3)损耗测量:GB10229—1988第10.7条;
- (4)绝缘试验:外施耐压试验 GB1094.3—2003第11条;
感应电压试验(包括局部放电测量) GB1094.3—2003第12条及表1;
操作冲击试验($U_m > 170\text{kV}$ 及以上) GB1094.3—2003第15条,GB7449—1987;
雷电冲击试验($U_m > 72.5\text{kV}$ 及以上线端全波)GB1094.3—2003第13条,GB7449—1987;
- (5)密封试验:JB/T8751—1998第4.8条;
- (6)绝缘油试验:GB1094.1—1996第10.9条;
- (7)绝缘特性测量:电抗器绝缘电阻、吸收比(R_{60}/R_{15})、极化指数($R_{10\text{min}}/R_{1\text{min}}$)和绕组的介质损耗因数 GB/T6451—1999。

1.2 型式试验

- (1)温升试验 GB1094.2—1996,GB10229—1988第10.15条;
- (2)雷电冲击试验($U_m \leq 72.5\text{kV}$ 线端全波、截波及全部电压等级线路截波和中性点全波)GB1094.3—2003第13条、第14条,GB7449—1987。

1.3 特殊试验

- (1)声级测量 GB/T1094.10—2003;
- (2)振动测量 GB10229—1988第10.14条;
- (3)电流的谐波测量 GB10229—1988第10.8条;
- (4)风扇和泵所需功率测量(如果有风扇和泵时);
- (5)磁化特性测量 GB10229—1988第10.12条;
- (6)电晕及无线电干扰测量;
- (7)感应电压试验(包括局部放电测量) GB1094.3—2003第12条及表1。

2 试验方法

2.1 电抗测量

对于大容量并联电抗器,由于它的功率因数非常小(通常在 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ 数量级),因此它的阻抗值基本上就是它的电抗值。此时并联电抗器的电抗为实测相电压与实测相电流(方均根值)之比。测量应在额定频率下进行,电源波形应近似于正弦波形(正负半周波形完全一样,且峰值与方均根值之比等于 $\sqrt{2} \pm 0.07$),试验时应使用带有峰值/ $\sqrt{2}$ 和方均根值显示的仪表(或单独的两台仪表)同时进行测量,以确认电源波形符合上述要求,同时应测量电源的频率,以便能够准确地计算电感值,如果采用功率分析仪进行测量则可同时测量上述参数。

对于大容量并联电抗器,由于通常都是带有间隙铁心和磁屏蔽,不是完全的线性,因此电抗的测量应在额定电压下进行。

现行的并联电抗器试验标准中对带有铁心和磁屏蔽的并联电抗器的电抗测量中规定:允许在不低于90%额定电压下测量(包括损耗测量),然后上推到额定电压。此规定是基于制定标准的当时试验设备能力的原因。但近年来由于试验技术和试验设备的发展及用户对试验等价性等要求的不断严格,目前均采用在额定电压下进行电抗和损耗的测量,尤其是磁化特性测量施加电压和电流

都远远超过额定电压和额定电流。因此,标准中的这一规定已不能满足用户的要求。

并联电抗器电抗测量的试验线路如图32-1所示。

额定电压和额定频率下,额定电抗容许偏差为 $\pm 5\%$,合同另有规定的按合同规定。

2.2 损耗测量

损耗测量应在额定电压、额定频率下进行,电压

应该使用平均值电压表。对于大容量并联电抗器,由于它的功率因数非常低,用瓦特表进行测量会产生非常大的误差,而这个误差是足可以影响测试结果的。这个误差是由几个方面产生的,其中有瓦特表的功率因数过大(目前的瓦特表功率因数无法做得很小)带来的有效读数准确度大大降低,更主要的是测量用电流互感器(在高压并联电抗器试验时,电压测量通常采用标准电容分压器)的“角差”会使测量值明显增大。

采用电桥法进行损耗测量可以减少测量误差,但电流互感器应采用带有“角差”自动补偿功能的电流互感器,这样可以较好地降低“角差”所导致的测量误差。瑞士产“2818”、“2877”电桥成套装置中的电流比较器,就是一个带有自动补偿功能的电流互感器。可以采用该电桥进行并联电抗器的损耗测量。该电桥系统对试验及测量接线要求比较严格,必须严格按照规定的接线方法,以保证测量的准确度。另外该电桥的电压测量是采用方均根值(有效值),因此应保证试验电压的波形要非常接近标准正弦波。

并联电抗器的损耗的各种分量中,电阻损耗是可以从总损耗区分开的,但铁损和附加损耗则是不可能区分开的。

测量的损耗数值要校正到参考温度(75°C)。损耗测量最好是在绕组的平均温度等于参考温度时进行,GB10229—1988规定:“如果不能做到这点,则认为附加损耗、铁损与温度无关”。很显然这对测量结果是不利的。如果有几台同样的电抗器需要做试验,GB10229—1988推荐了下述方法:“将一台电抗器近似于参考温度时做型式试验,测量损耗,并在常温下测量损耗,由此得出总损耗的温度系数(假定为线性变化)。然后其余各台电抗器可在常温下测量,其损耗值按型式试验的电抗器得到的温度系数校正到参考温度。”这种方法有些时候是可行的,有些时候绕组的温度是达不到参考温度的,这主要取决于电抗器的绕组温升试验时的环境温度。还有一种方法可供参考,即采用热油循环的方式将电抗器绕组温度加热到参考温度并在此温度下测量损耗,再按GB10229—1988推荐的方法得出总损耗的温度系数,并用该温度系数对其他电抗器的损耗进行校正。

采用电桥法测量损耗的试验线路如图32-2所示。

采用电桥法测量,并且采用瑞士2877或2818电桥,可以同时的电抗值和损耗值进行测量。

在额定电压时测得的损耗值或者校正到额定电压的损耗值应乘以额定电流和测量电流(或额定电压下的电流)的比值的平方进行计算。

损耗的容许偏差:按上述方法测量计算的总损耗,不应超过损耗保证值的 $+15\%$,合同另有规定的,应按合同规定。

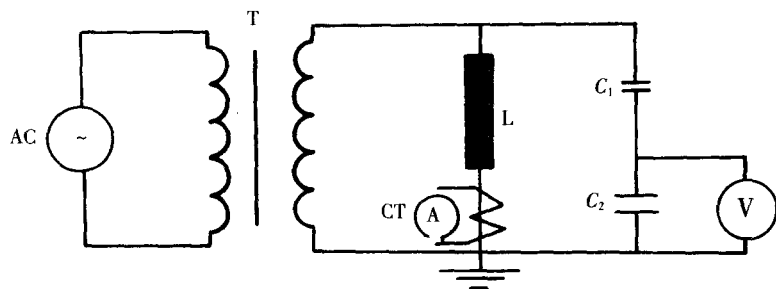


图 32-1 并联电抗器电抗测量试验线路

AC—供电电源,通常是经发电机输出通过中间变压器提供 T—能输出被试电抗器额定电压和额定电流的试验变压器 CT—精密电流互感器 L—被试并联电抗器 C_1 、 C_2 —标准电容分压器

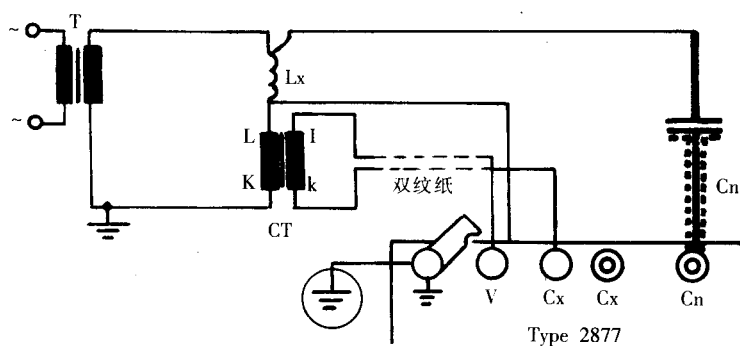


图 32-2 电桥法损耗测量试验线路

T—试验变压器 Lx—被试并联电抗器 CT—电流比较器(带有补偿功能的电流互感器) L、I、K、k—电流比较器的接线端子 Cn—标准电容器($\tan\delta \leq 1 \times 10^{-5}$) Type 2877—瑞士产 2877 型电桥

表32-1是一台500kV、50Mvar并联电抗器的电抗和损耗测量结果。

表 32-1 阻抗及损耗测量结果

U/kV	I/A	$L(32^\circ\text{C})/\text{H}$	损耗(32℃)/kW	损耗(75℃)/kW	阻抗(75℃)/Ω
318	159	6.374	91.32	98.20	2 002.5

2.3 磁化特性测量

磁化特性是并联电抗器的一个重要指标,该指标反映出并联电抗器的电抗值的线性程度和范围。用户对该项指标的要求和对试验条件的要求也日趋严格,GB10229—1988对试验电压的上限并没有界定,但目前对于500kV并联电抗器,一般用户都要求尽可能做到接近或达到1.5倍的额定电压。因此该项试验要求试验设备容量和电压必须分别满足被试并联电抗器1.5倍的额定电压和2.25倍的容量,同时还要考虑试验变压器本身的阻抗电压和产品实际电流的非线性,实际试验电压和容量会更高一些。至少短时容量应满足上述要求。

磁化特性的测量在工频电压和电流下进行,并逐步升高试验电压到并联电抗器的最高运行电压,然后继续升至合同要求的数值(对于高电压大容量并联电抗器,通常需升至1.5倍的额定电压。)或者低于合同规定的电压值,但此时电抗器已呈接近饱和状态。

测量结果应该以电压平均值(其值与磁链峰值成正比例)和电流峰值的关系表示。

磁化特性的测量的试验接线与电抗测量的试验接线相同,表32-2是一台500kV、50Mvar的并联电抗器磁化特性的实际测量结果。

表 32-2 磁化特性测量结果

U/kV	318	349	381	413	445	476
I/A	159	174	191	208	226	244

根据表32-2中的测量结果,就可以作出该并联电抗器的磁化曲线,并可以计算出在合同规定的励磁范围内电抗的非线性的程度以及判定被试并联电抗器的磁化特性是否达到合同的要求。

2.4 温升试验

与电力变压器温升试验有所不同,并联电抗器的温升试验由于它的总损耗中的各种损耗是无法区分的,在它的最高运行电压下,它的所有损耗就已经包括进去了,因此它的温升试验只是对电抗器施加额定频率的最高运行电压,GB10229—1988标准中同时允许在试验过程中不能达到最高运行电压时,可以在不低于90%最高运行电压下进行试验,然后按照GB1094.2—1996校正到最高运

行电压。试验中的测量按GB1094.2—1996的规定。试验前、后及试验中应进行变压器油的检验,并且应对变压器油箱进行红外线扫描,以便能够发现可能存在的内部过热和油箱的局部过热。

2.5 雷电冲击和操作冲击试验

并联电抗器的雷电冲击试验和操作冲击试验按GB1094.3—2003、GB7449—1987进行,其中雷电冲击试验的方法、波形、示伤判定与电力变压器的雷电冲击试验相同,可参见本书相关章节;而操作冲击试验与电力变压器有所不同,首先是由于并联电抗器的铁心不是一个闭合的磁路(带有间隙),在操作冲击时呈现线性电感状态(波形不具有磁饱和的形态,有关电抗器的操作冲击的原理计算参见GB7449—1987),因此在全电压操作冲击前不需要施加降低电压的反向冲击(试图用反向冲击方法增加全电压的波形作用时间是无效的)。另外用常规的试验回路试验时,对于大容量并联电抗器,尽管冲击发生器的主电容很大或者放电电阻很大,但操作波波形中 T_d (90%电压持续时间)通常也是达不到 $\geq 200\mu s$ 标准要求的(若 T_d 满足要求,则 T_1 就会很短,并且反峰可能很大)。减小发生器的波前电阻一般会使 T_d 时间有所增加,但也很难达到标准要求,同时减小波前电阻还会导致波形的反峰超过标准规定的50%,并且反峰增加对于被试品也是不利的。GB7449—1987标准中对大容量并联电抗器操作冲击的 T_d 时间允许降低到不小于 $120\mu s$,但许多用户对此也是不大接受的。这个问题的有效方法是在被试电抗器端对地并联接入负荷电容,其原理是增加被试品的等效阻抗,这从理论计算到实际都是可行的,接入的负荷电容的操作冲击耐受电压必须高于被试电抗器的试验电压,其电容量选择与被试电抗器的电抗值有关,通常为 $8\ 000pF\sim 13\ 000pF$ 。目前国内的许多制造厂均采用该方法,可以很容易的使 T_d 时间满足标准要求。电抗器的操作冲击试验接线如图32-3所示。

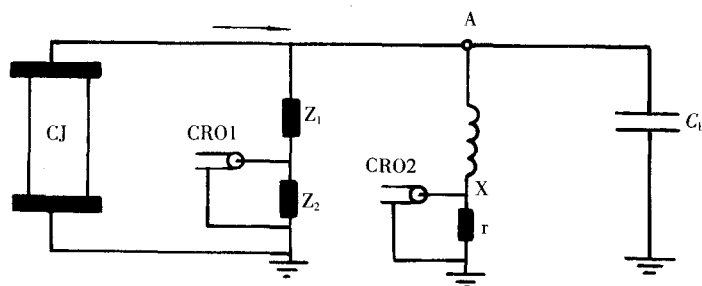


图 32-3 操作冲击试验线路图

CJ—冲击电压发生器 Z_1 、 Z_2 —阻容分压器的高、低压臂 CRO1、CRO2—电压测量和试品电流测量(进入数字记录仪) r —分流器 A、X—被试并联电抗器的首、末端 C_b —负荷电容

操作冲击的示伤判断方法与电力变压器相同,参见本书相关章节。

2.6 感应耐压试验及局部放电测量

与一般电力变压器的感应耐压试验原理和相应的试验标准一样,但施加电压的方式却有所不同,一般的电力变压器的感应耐压试验是从低压侧励磁,而高电压大容量并联电抗器仅有一个绕组,它的感应耐压试验电压只能从高压端直接施加,并且它的试验电流是呈电感性的。

按GB1094.3—2003规定,该项试验分为短时感应耐压试验(ACSD)和长时感应电压试验(ACLD)。

在进行短时感应耐压试验时,可以进行局部放电测量,也可以不进行局部放电测量,试验电压和时间按GB1094.3—2003规定(同电力变压器试验相同)。为了不使绕组匝间电压过高,一般应采用增压变压器(支撑变压器)辅助施加电压,此时的试验原理接线如图32-4所示。

在选用增压变压器时要考虑其容量,同时由于并联电抗器通常是分级绝缘的,采用增压变压

器时应注意被试并联电抗器末端承受电压一般不应超过它本身绝缘水平的85%较为合适。试验的程序、被试品通过试验的判定与电力变压器相同，均按GB1094.3—2003规定。

在进行长时感应电压试验时要同时进行局部放电测量，此时不应采用增压变压器，被试电抗器的末端应直接接地。试验方法按GB1094.3—2003，但试验程序与电力变压器有些不同，即可以略去短时间的预加电压 U_1 程序，其他均按GB1094.3—2003规定进行。局部放电测量的试验原理接线如图32-5所示。

由于并联电抗器局部放电的试验接线与电力变压器不同，电压是直接从小高压端施加的，而且电压是很高的，所以所有与高压连接的引线都应采用高压无晕的接线方式，试验中最好采用线路电晕检测

仪检测和排除线路中可能出现的电晕放电。目前国内外已有许多比较成熟的电晕检测仪产品，对于检测线路中的电晕放电具有较高的灵敏度。

电力变压器在感应电压试验中，当试验频率较高时（如 $\geq 150\text{Hz}$ 时），试验电流通常呈电容性，而在电抗器感应耐压试验时，试验电流是呈电感性的。而且通常的电源的容量是不能满足要求的，因此试验中必须采用电容补偿，这时要考虑补偿电容器的过电流情况，电容器仅能承受 $U_{\text{额定}} \times \frac{f_{\text{额定}}}{f_{\text{试验}}}$ 的电压。

3 并联电抗器试验专用的试验设备和测试仪器

由于高电压大容量并联电抗器的结构特点和它的试验方法与电力变压器有许多不同之处，因此它的试验设备和测试仪器也在许多方面与用于电力变压器试验的不同，需要一些专门的设备和仪器。

3.1 试验变压器

对于并联电抗器，几乎所有的绝缘试验的施加电压的方式都是从高压端直接施加的。因此需要一台电压较高的而局部放电量较小的试验变压器，试验变压器的容量可以根据电容器补偿的方式进行选择。通常的补偿方式有两种，一种是常用在试验变压器的高压侧补偿（电容塔），这时试验变压器的容量可以小一些，但对补偿电容器组及系统的局部放电水平要求比较高（这对于超高压并联电抗器的试验是相当困难的），并且在磁化特性测试中，当电抗器铁心到达非线性区间（接近饱和）时，受试验变压器容量限制，电压无法继续向上增加，有可能不会得到比较满意的测试结果。另一种补偿方式是在试验变压器的原方（低压侧）进行补偿（电容器组），这种补偿是仅对供电电源

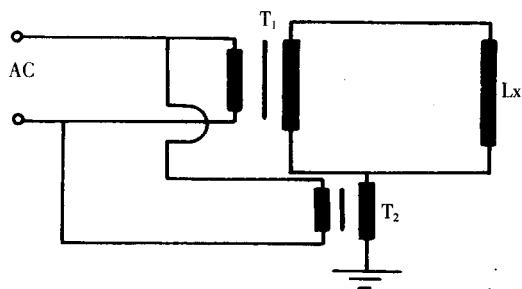


图 32-4 感应耐压试验线路图

AC—高周波电源(100Hz~200Hz) T₁—试验变压器
T₂—增压变压器(支撑变压器) L_x—被试并联电抗器

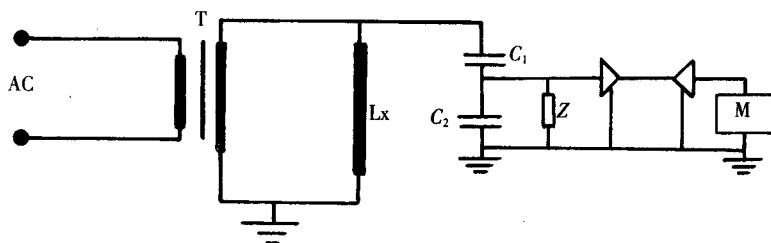


图 32-5 局部放电测量线路图

AC—供电电源(100Hz~200Hz) T—试验变压器 L_x—被试并联电抗器
C₁、C₂—由套管及测量屏代替的电容分压器 Z—局部放电接收阻抗
M—局部放电测试仪

的电感性电流进行补偿,此时由于试品试验容量完全由试验变压器提供,因此试验变压器需要很大的容量。第二种补偿方式的优点是:因为电容器组的电压比较低,系统的局部放电容易控制,更主要的是大功率试验变压器能够承受较大的短时过电流,在电抗器非线性状态下容易得到较为满意的测量结果。但试验变压器的价格和制造难度是比较大的。随着并联电抗器的电压等级不断提高和容量不断增大以及用户对试验的要求越来越高,总的发展趋势是采用大容量的试验变压器而在低压侧电容器组补偿的方式。为满足即将开始研制的 1 000kV、240Mvar~300Mvar 并联电抗器的试验,有的制造厂已经开始研制电压等级为 $1\,700/\sqrt{3}$ kV、稳态容量为 370MVA (短时容量为 560MVA) 的单相变压器,用于将要研制的 1 000kV 电压等级的并联电抗器试验。

3.2 补偿电容器组

并联电抗器的试验容量通常是很大的,尤其是在 1.5 倍额定电压下的磁化特性测量时,它的试验容量>2.25 倍的电抗器额定容量,而这个容量几乎都是无功分量(有功分量很小,计算补偿时可以忽略),所以需要等容量的电容器组进行补偿。如果补偿电容器系统与试验电压匹配的不是最佳状态,所需补偿电容器组的容量则要更大一些。因此并联电抗器试验所需要的补偿容量远大于电力变压器温升试验时的补偿容量。

3.3 高精度电感电桥及带有自动补偿装置的高精度电流互感器

通常大容量并联电抗器的有功分量是很低的,由于其结构,它的损耗测量只能在最高电压的运行条件下测量,在此状态下,其损耗比无功分量小几个数量级,因此损耗测量通常采用电桥,通过测量其有功分量与无功分量之比的正切值($\tan\delta$)来实现,这样可以提高测量的精确度,同时必须采用带有自动补偿装置的电流互感器,以消除“角差”所带来的误差。高精度电感电桥是并联电抗器损耗测量的必不可少的仪器。

第三节 平波电抗器试验

平波电抗器用于高压直流换流站直流侧的直流滤波回路,它能阻止直流线路或直流开关站产生的陡波(冲击波)进入阀厅,从而保护换流阀,避免遭受过电压的作用;同时,平波电抗器能够降低直流电流中的纹波系数。因此,平波电抗器是高压直流换流站中的重要设备之一。

平波电抗器工作在带有一定纹波的高压直流线路中,运行时流过很大的直流电流,并且它的出线端均处于对地高电位状态,这决定了它的出线端必须是同一绝缘水平(全绝缘)。由于平波电抗器运行方式和工作状态不同于其他类型的电抗器(如并联电抗器等),因而它的试验项目和方法也与其他电抗器有较大的差异。本章仅对平波电抗器特有的试验项目进行论述,其他与电力变压器、并联电抗器和高压直流换流变压器相同的试验项目请参阅本书有关章节。

1 试验项目和标准

1.1 出厂试验

- (1)绕组直流电阻测量 GB1094.1—1996 第 10.2 条;
- (2)微分电感测量 GB10229—1988 第 60.5 条;
- (3)交流和直流电压的外施耐压试验 GB1094.3—2003 第 11 条;
- (4)雷电冲击和操作冲击试验 GB1094.3—2003 第 13、15 条;

对于油浸式平波电抗器还需要进行下列试验:

- (1)绝缘电阻、吸收比和极化指数测量 GB/T6451—1999;
- (2)绕组绝缘的介质损耗因数($\tan\delta$)和电容测量 GB/T6451—1999;
- (3)绝缘油试验 GB1094.1—1996 第 10.9 条。

1.2 型式试验

温升试验 GB10229—1988 第 60.7 条。

1.3 特殊试验

(1) 耐受短时电流试验 GB1094.1—2003 第 4.2 条；

(2) 声级测定 GB1094.10—2003；

(3) 高频阻抗测量 GB10229—1988 第 60.10 条；

(4) 损耗测量 GB10229—1988 第 60.7 条。

2 试验原理和方法

2.1 微分电感的测量

微分电感是指平波电抗器在通过一定直流电流的状态下的电感值。有时也称为增量电感。

微分电感测量的基本方法为伏安法。即在平波电抗器两端施加一定频率、一定数值的电压，测量通过平波电抗器的电流值，并计算出平波电抗器的电感。

对于无铁心及无磁屏蔽的平波电抗器，由于它不存在非线性及磁滞损耗、涡流损耗，它的微分电感的测量可以在任意频率及任意直流状态下测量，也可以在不加直流的情况下测量。

对于具有铁心或磁屏蔽的平波电抗器，应该在叠加有规定谐波电流的额定直流和零直流电流（即空载）下测量。GB10229—1988 推荐了两种参考测量线路如图 32-6、图 32-7。在实际试验中，可以根据平波电抗器的容量以及试验设备、仪器情况，选择其中一种，也可以采用符合测量原理、并满足标准要求、用户认可的其他试验线路。

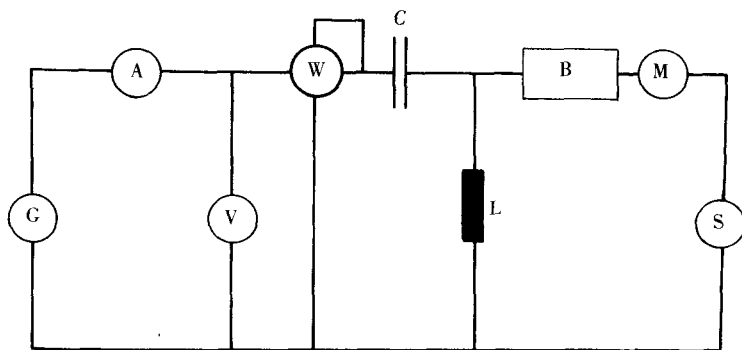


图 32-6 测量微分电感和谐波电阻线路图

L—被测平波电抗器 G—高频交流电源 A—测量回路谐波电流 I_H 的电流表 V—测量回路谐波电压的电压表（静电电压表） W—测量 P_H 的功率表 C—隔直电容器 B—低通滤波器（阻止交流通过） S—直流电源 M—直流电流测量装置（大电流大容量标准分流器）

在图 32-6 中，对直流电源 S 和滤波器 B 要求较高，如果纹波分量太大，将会影响微分电感测量的准确性，误差增大。

无铁心及无磁屏蔽的平波电抗器测量时，可以不必有 C、S、B、M。

微分电感 X_H 可用下式计算：

$$X_H = \frac{V_H}{I_H} = f(I_0) \quad (32-1)$$

式中 V_H ——施加电压，V；

I_H ——施加电流，A。

对于容量很大的平波电抗器，通常采用图 32-7 所示的桥式线路。桥式线路是将两台同样的平

波电抗器同时测量，它的优点在于所测交流电压不受直流电源中纹波分量的影响，因而对直流电源的纹波要求相对不高。它的缺点是所测得电感值是两台平波电抗器的数值，并不能区分这两台电抗器之间的误差。对于图 32-7 的线路， X_H 用下式计算：

$$X_H = \frac{2V_H}{I_H} \quad (32-2)$$

对于高压大容量平波电抗器，微分电感的容许偏差：

IEC289—1987 规定为不大于 $\pm 7\%$ ；

GB10229—1988 没有明确规定，通常控制在不大于 $\pm 5\%$ （正在起草的平波电抗器标准定为不大于 $\pm 5\%$ ）。

额定直流电流下的微分电感值应满足上述标准要求，其他电流值下的微分电感值可按用户与制造厂签署的技术协议要求。

表 32-3 是一台平波电抗器微分电感实测结果（桥式线路）。

2.2 损耗计算和温升试验

2.2.1 平波电抗器损耗计算

由于平波电抗器是工作在含有一定谐波分量的直流电路中，它的总损耗的测量是比较困难的，通常是通过计算得到的。

平波电抗器的总损耗等于额定参数时的直流损耗、谐波损耗和铁心损耗（对于带铁心的油浸电抗器）之和，即：

$$P_c = P_{dc} + P_n + P_m \quad (32-3)$$

式中 P_c ——总损耗，kW；

P_{dc} ——直流损耗， $P_{dc} = I_{dN}^2 R$ ，kW；

I_{dN} ——负载条件下的直流电流（额定直流电流），A；

R ——包括引线在内的绕组电阻， Ω ；

P_n —— n 次谐波损耗， $P_n = \sum_{n=2}^{48} I_n^2 R_n$ ，kW；

48——估算的最高谐波次数，对于平波电抗器仅计算偶次谐波；

I_n —— n 次谐波电流，A；

R_n —— n 次谐波绕组电阻， Ω ；

P_m ——铁心损耗， $P_m = 0.125 P_{dc} \sum_{n=2}^{48} P_{hn} + 0.125 P_{dc} \sum_{n=2}^{48} P_{en}$ ，kW；

$\sum_{n=2}^{48} P_{hn}$ ——磁滞损耗分量，kW；

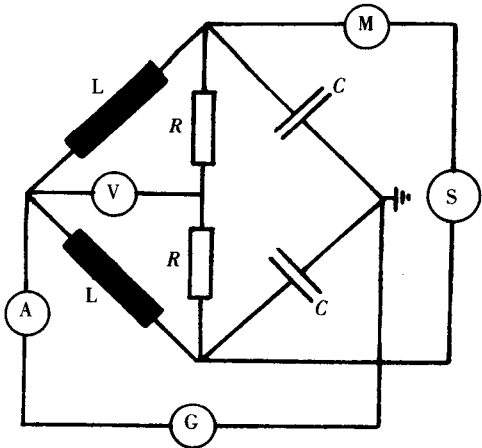


图 32-7 测量微分电感的桥式线路图
L—平波电抗器 R—测量电压的辅助电阻

表 32-3 一台平波电抗器微分电感测量结果

I_{dc}/A	U_{AC}/V	I_{AC}/A	L/mH	f/Hz
0	269.46	6.173 6	277.877	49.998
750	268.69	6.160 8	277.865	49.961
1 504	268.31	6.152 8	277.644	49.995
2 251	267.82	6.146 4	277.292	50.019
3 002	268.59	6.187 0	276.364	50.001
3 340	267.24	6.170 8	275.713	49.998
3 754	265.26	6.164 0	274.005	49.995

注： $L = 2 \times \frac{U_{AC}}{\omega I_{AC}}$

$$\sum_{n=2}^{48} P_{en} \text{—— 涡流损耗分量, kW。}$$

铁心损耗计算公式为 12 脉动换流系统时平波电抗器铁心损耗的经验公式

$$P_{hn} = \left(\frac{I_n}{I_{dN}} \right) \times n \quad (2 \leq n \leq 48)$$

$$P_{en} = \left(\frac{I_n}{I_{dN}} \right)^2 \times n^{0.5} \quad (10 \leq n \leq 48)$$

$$P_{en} = \left(\frac{I_n}{I_{dN}} \right)^2 \times n \quad (2 \leq n \leq 10)$$

$$P_{en} = \left(\frac{I_n}{I_{dN}} \right)^2 \times 4 \quad (n=2)$$

2.2.2 平波电抗器温升试验

由于平波电抗器运行在含有谐波分量的直流电流中,它的温升试验也是在施加直流电流下进行的,施加的直流电流值应等效总损耗时的电流,即:

$$I_T = \sqrt{\frac{P_c}{R}} = \sqrt{\frac{I_{dN}^2 R + \sum_{n=2}^{48} I_n^2 R_n + 0.125 P_{dk} \times \sum_{n=2}^{48} (P_{hn} + P_{en})}{R}} \quad (32-4)$$

式中 I_T ——等效总损耗时的直流电流, A;

I_{dN} ——平波电抗器的额定直流电流, A。

直流电流采用大电流大容量的分流器测量。

有关温升试验的程序和测量方法按 GB1094.2—1996 规定。

2.2.3 损耗计算及温升试验实例

产品参数: $I_{dN}=3\,000\text{A}$, $S_N=1\,500\text{MVA}$

谐波电流损耗和铁心损耗:

$$P_n + P_m = \sum_{n=2}^{48} I_n^2 R_n + 0.125 P_{dk} \sum_{n=2}^{48} (P_{hn} + P_{en}) = 136.0 \text{ (kW)}$$

$$R_{80^\circ\text{C}} = 61.53 \text{ m}\Omega, \quad I_{dN} = 3\,000 \text{ A}$$

$$P_{dk} = I_{dN}^2 R_{80^\circ\text{C}} = 3\,000^2 \times 61.53 \times 10^{-3} = 553.77 \text{ (kW)}$$

$$P_c = I_{dN}^2 R_{80^\circ\text{C}} + \sum_{n=2}^{48} I_n^2 R_n + 0.125 P_{dk} \sum_{n=2}^{48} (P_{hn} + P_{en}) = 553.77 + 136.0 = 689.77 \text{ (kW)}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{P_c}{R}} = \sqrt{\frac{I_{dN}^2 R + \sum_{n=2}^{48} I_n^2 R_n + 0.125 P_{dk} \times \sum_{n=2}^{48} (P_{hn} + P_{en})}{R}}$$

$$= \sqrt{\frac{689.77}{61.53 \times 10^{-3}}} = 3\,348.2 \text{ (A)}$$

加压原理接线如图 32-8 所示。

加压过程:在平波电抗器上施加直流电流 3 348.2A,经过 6h 稳定。

温升测量结果如表 32-4 所示。

温升试验期间,用红外线扫描仪观察到的油箱表面热点温度为 61.6℃。位置在正对 L 线圈 B 端的上部。

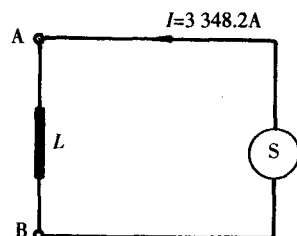


图 32-8 温升试验原理线路

2.3 高频阻抗测量

高频阻抗测量可在低电压下进行。GB10229—1988 推荐的测量频率为：

- (1) 50Hz~2 500Hz 线端对线端；
- (2) 30kHz~1MHz 线端对线端，线端对地。

测量可以采用专用的仪器，如日本产的 4194A 型数字阻抗分析仪；也可以使用其他的方法，如使带有功率输出的中、高频信号发生器和高频电流电压及功率测量装置（伏安法）。

采用日本产的 4194A 数字阻抗分析仪进行测量，测量线路如图 32-9 所示。

表 32-5 是一台平波电抗器高频阻抗的实测结果。

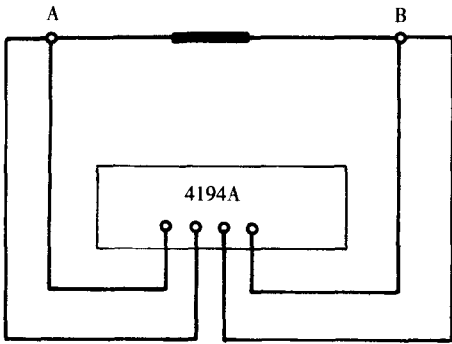


图 32-9 高频阻抗测量线路

2.4 平波电抗器的声级测量

运行中的平波电抗器的噪声主要产生于直流系统中的谐波，其声级大小取决于谐波分量的大小，作为制造厂想要模拟实际运行中的状态测量其声级通常是很困难的，一般采用 100Hz 的电流进行测量，当施加 100Hz 电流测量时，应由用户提供其系统 100Hz 的谐波分量，再施加此分量的电流测量其声级水平。测量频率和电流在试验前需经用户与制造厂共同认可。

测量程序和方法按 GB/T1094.10—2003 规定进行。

2.5 平波电抗器的振动测量

在制造厂可以模拟平波电抗器运行中的实际电流进行振动测量（该项测量应在现场运行时进行），测量时平波电抗器的工况选择应由用户和制造厂共同协商确定。测量应在油箱四个垂直面取足够的测量点，求其算术平均值作为测量结果，并以振动波主波峰的高度来表示，最大不超过 200 μm 。

表 32-4 温升测量结果

	HV	保证值
顶层油温升 $\Delta\theta_o/\text{K}$	25.8	50
平均线圈温升 $\Delta\theta_w/\text{K}$	45.2	55
最热点温升 $\Delta\theta_c/\text{K}$	54.9	65
线圈平均温度-平均油温 $\Delta\theta_{w0}/\text{K}$	22.4	—

表 32-5 高频阻抗实测数据 ($T=21.2^\circ\text{C}$)

f/Hz	电感值/mH	电阻值/ Ω	电抗值/ Ω
50	271.2	0.35	85.18
100	270.9	0.73	170.0
150	271.0	1.28	255
200	271.0	1.96	340
300	271.0	3.93	510
400	270.5	6.53	680.0
500	270.4	9.68	849.5
600	270.3	13.45	1 019
800	270.1	22.7	1 358
1 200	269.5	47.6	2 032
1 800	268.5	98.3	3 038
2 400	267.5	164.1	4 037
3 000	266.6	244.7	5 031

附录 A STL 导则:高压测量系统与国家测量标准的比对校正

1 STL 导则主要内容

本 STL 导则属于执行 IEC 60060-2:1994《高电压试验技术 第 2 部分 测量系统标准》的具体化,可供其成员国各试验室使用,试验基于与标准测量系统比对,可应用于认可测量系统的校正。

1.1 认可试验

- (1)确定刻度因数;
- (2)线性度试验;
- (3)短期稳定试验;
- (4)温度效应;
- (5)临近效应。

1.2 性能试验

性能试验用标准测量系统比对法,要周期性地进行。首次性能试验要在认可试验室或国家校正当局进行。例如在验收测量系统期间,以后的全部周期性能试验可借助任何标准测量系统。

1.3 周期性的性能试验

检验可在 STL 成员试验室内进行。

1.4 校正的一般程序

高压测量系统包括:

- (1)高压转换装置;
- (2)转换装置即测量仪表的连接系统;
- (3)测量仪表(如仪表用数据处理、软件是仪表的一部分)校正应在测量系统使用中的各种电压波形下进行。测量仪器应在每一输入电压量程内校正。

若在全电压下进行,三部分要同时校正。

若测量系统在低于全电压下校正,则低电压的测量仪器要校正到其全电压。

1.5 校正地点

下列认可的测量系统应校正于其所使用处:

- (1)大于 300kV 电压的 DC 和 AC;
- (2)大于 1MV 雷电冲击;
- (3)操作波和波前截断冲击。

低额定电压的系统可校正于不同处,但应用计算证明,在使用处其邻近效应可提供足够的精确性。

按 IEC 60060-2 确定标定的刻度因数最好在 100%,至少在 20%额定电压下进行。对雷电冲击限值 200kV(见 IEC 60060-2,6.1 节)是许可的。这一限值仅用于大的测量系统,对操作冲击也需要校正。在 STL 内建议用此限值。因此,适当的标准测量系统其额定电压至少有 20%校正到要认可测量系统。

1.6 认可测量系统校正周期

周期性的性能试验周期不超过:

对整个测量系统 5 年;对低压仪表当用同电压波形进行性能检验时 5 年;当用不同电压波形进行检验时 2.5 年;当不施行性能检验时 1 年。

这对低电压仪器特别重要,当用不同电压波形可能不行或无意义时,不同校正周期建议乃基于在低压仪表上。

2 规定的性能试验程序

2.1 刻度因数的确定

标准测量系统应与认可测量系统并联(电压)或串联(电流)。应用时读取两个系统的读数,用校正测量系统每次测量的读数除以认可测量系统的读数,得到一个刻度因数后,重复此程序得到 n 个独立的读数($n \geq 10$),取其平均值 F_m ,作为认可测量系统的刻度因数,所提供的试验标准偏差可由下式算出:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (F_i - F_m)^2}{n-1}}$$

S 应小于 $1\%F_m$ (对 DC、AC、冲击与操作波)与小于 $3\%F_m$ (对截波)。

2.2 线性度

应在工作电压(电流)范围的最小和最大电压及这两个极值之间的三个近似等分电压下测量刻度因数,这 5 个值与其平均值之差不大于 $\pm 1\%$,则被认可。

如 S 在 $0.2\% \sim 0.4\%$ 范围,则试验次数可按表 A-1。

对冲击、截波和操作波还要用两种波形分别算出 S_1 与 S_2 ,然后用下式计算:

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$$

对冲击:最短波前时间 $\leq 0.84\mu s$;最长波前时间 $\geq 1.56\mu s$

对截波最短与最长时间由使用者规定。

对操作波最短波前时间 $\leq 200\mu s$;最长波前时间 $\geq 300\mu s$ 。

2.3 动态特性试验

对冲击、截波与操作波还要做动态特性试验,算出的 S 要小于 $5\%F_m$ 。

2.4 干扰试验

对冲击、截波和操作波还要做干扰试验。

干扰试验只有在测量系统使用地做才有用。干扰要求小于 1% ,这对多数接地条件下是严峻的。

在全电压下进行,截波还要在波尾 $2\mu s \sim 6\mu s$ 处截断,操作波要在波前用间隙截断,要选用下列方法之一。

(1)如暂态记录仪被用于灵敏度记录,将设定记录干扰,连接电缆在输入端短路。不改变转换装置的接地条件,如记录到的峰值电压小于 1% 无短路时的记录值,则要求已达到,如高于 1% 干扰波形即叠加在冲击记录波形上,其测量准确度的有效性要由校正人员判断。

(2)若用 5 次冲击全波和 5 次波尾截断的截波(用同一发生器)施加,用峰值表和示波器,峰值记录的平均值不大于 1% 。波前记录时间的平均值不大于 5% 。

3 总测量不确定度的计算

确定总测量不确定度的原则在 IEC 60060-2 附录 H 中给出,要与 EN 60060-Z/A11 有区别,

表 A-1 线性试验次数($n \geq 10$ 个读数)

获得的标准偏差	每一电压级次要求的读数
$<0.2\%$	1
$<0.4\%$	3
$>0.4\%$	10

后者有更多的例子,因而应用会更好,区别在于:

(1)统计不确定度:按 IEC 60060-2 在性能试验中确定,要遵从高斯分布。

(2)系统不确定度:它们是系统的,不知其如何变化。①测量系统对标准系统的不确定度,计算为 u ;②测量系统的非线性 a_1 ;③短期稳定性 a_2 ;④温度效应 a_3 ;⑤邻近效应 a_4 ;⑥长期稳定性 a_5 ;⑦过正常期的刻度因数变化 a_6 ;⑧雷电冲击平均曲线,包括软件在内确定的不确定度 a_7 。

这些不确定度假定遵从矩形分布,未知的系统变化可作刻度因数的校正,可能不包括在计算测量总不确定度内。

测量总不确定度 u 可由下式给出:

$$u=k \cdot \sqrt{S^2 + \sum \left(\frac{u_i}{k_i} \right)^2 + \frac{1}{3} \sum a_i^2}$$

对置信度为 95%,IEC 推荐 k 等于 2。

标准系统对认可测量系统可应用以下值:

$u_i \leq 1\%$ 标准测量系统不确定度包括两个校正,例如分别校正分压器与仪器, u 的两个值要计算在内;

$S \leq 1\%$ (1 个值)

$a_i \leq 1\%$ 按 IEC 60060-2 (有 5~7 个值)

若许用限值要全部利用,总测量不确定度对 AC/DC 峰值测量将为 3.4%,对冲击测量将为 3.6%,这将高于试验或计算确定的不确定度(对 DC 和冲击,不确定度与极性有关,因此总不确定度将决定于两个极性的较高值)。

3.1 确定测量的非线性度

$$a_1 = \left| \frac{F_m - F_M}{F_M} \right| \text{最大值}$$

式中 F_m ——2.2 所列 5 个不同电压级次之一;

F_M ——5 个电压的平均值。

3.2 短期稳定性

$$a_2 = \left| \frac{F_{m \text{ 开始}} - F_{m \text{ 终止}}}{F_{m \text{ 开始}} + F_{m \text{ 终止}}} \right|$$

式中 $F_{m \text{ 开始}}$ ——起始刻度因数;

$F_{m \text{ 终止}}$ ——终了刻度因数,经过规定的时间(例如 10min)得到 $F_{m \text{ 终止}}$ 。

3.3 温度效应

3.3.1 确定温度系数的方法

整个测量系统对温度系数的变化应该由制造厂表述,温度系数要列在性能记录表上,性能记录必须规定高压分压器的变比。温度系数(包括连接电缆和低压仪器)且应该在试验室建立,不同的元件,运行温度必须考虑进去。

通常温度系数由转换装置给出,其中对测量仪器仅给出温度范围,以满足已知的准确度,确定温度效应的程序如下:

(1)确定转换装置所用的温度量程;

(2)确定转换装置的温度效应;

$$a_{3CD} = \frac{1}{2} | (C_{IH} - C_{IL}) (T_{\max} - T_{\min}) |$$

式中 a_{3CD} ——转换装置的温度效应;

C_{HI} ——高压部分的温度系数;

C_{LI} ——低压部分的温度系数;

T_{max} ——最大运行温度;

T_{min} ——最小运行温度。

(3)确定转换装置所用的温度量程;

(4)确定测量仪器的温度效应。

$$a_{3MI} = \frac{1}{2} C_{MI} (T_{max} - T_{min})$$

式中 a_{3MI} ——测量仪器的温度效应;

C_{MI} ——测量仪器的温度系数。

若仪器的温度系数为未知,温度效应可以从制造厂保证的测量不确定度确定。

$$a_{3MI} = \frac{1}{2} \sqrt{3e_{MI}^2}$$

式中 e_{MI} ——仪器测量不确定度

若仪器所用的量程大大低于制造厂规定的量程,温度效应可用下式估计:

$$a_{3MI} = e_{MI} \cdot \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{spec}}$$

式中 T_{spec} ——制造厂规定的温度量程

若用此值,导致温度效应不被接受,刻度因数必须确定为超过温度量程。

于是温度效应决定于: $a_3 = \sqrt{a_{3CD}^2 + a_{3MI}^2}$

3.3.2 高压分压器的温度系数

若转换装置的温度系数为未知,可按导则后面的估计。电缆连接的刻度因数可以略去不计,只要其电容量小于低压电容量的1%。

3.3.2.1 高、低压电阻

碳电阻不被接受,提供温度取决于变比,由测量决定。金属电阻层或绕线电阻温度系数为 $C_t \leq 0.01\%/K$ 。

3.3.2.2 高压电容器

气体和油纸电容器为常用。串联阻容分压器可考虑为容性。

气体电容: $C_t = 0$

油纸电容: $C_t = (0.02 \sim 0.06)\%/K$

注:油纸电容器的温度系数似乎与所加电压频率有关,此项目还需进一步验证。

3.3.2.3 低压电容器

聚酯电容器: $C_t = 0.05\%/K$

聚碳酸酯电容器: $C_t = (-0.02 \sim 0.01)\%/K$

聚丙烯电容器: $C_t = 0.03\%/K$

聚苯乙烯电容器: $C_t = (-0.01 \sim 0.025)\%/K$

3.4 邻近效应

按 IEC 60060-2,5,7 测量系统的邻近效应作为接收试验项目,它是由于杂散电容改变分压比引起的邻近效应。由于它的运行原则,下列三项无需考虑邻近效应。

DC 电阻分压器;

电阻分压器用于全波;

用于 AC、SI 或 LI 测量的屏蔽电阻分压器。

对末屏蔽电容式、串联阻尼电容式用于波前截断的电压分压器,需要考虑邻近效应。

邻近效应由下式给出:

$$a_4 = \left| \frac{F - F_m}{F_m} \right|$$

式中 F_m ——用标准测量系统校正的测量系统刻度系数;

F ——测量系统给出的与 F_m 差别最大的刻度系数。

3.5 长期稳定

长期稳定是对测量系统的一项要求,其值要在长期之后才能得到,因此不能对一新的测量系统引入长期稳定,以确定其总测量不确定度。只能在长期运行之后才有可能合适地确定。因此,测量系统的长期稳定应该由以下步骤确定:

(1)新测量系统用 $a_5=1\%$;

(2)若以后周期性能检查或性能试验表明长期不稳定要小, a_5 可能降低,以前校正也按 IEC60060-2:1994 标准做,可以建立更小的 a_5 值。

3.6 过正常期的刻度因数变化

当性能试验时确定刻度因数,其值用于确定总不确定度:

$$a_6 = \left| \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}} \right|$$

式中 F_{\max} ——正常期的最大刻度因数;

F_{\min} ——正常期的最小刻度因数。

3.7 估计冲击峰值的不确定度

此系统的误差仅应用于无平滑波形的冲击,对不规则的波形取平均曲线,峰值取自平均曲线。若峰值不规则(例如过冲)持续时间短(小于 $1\mu s$)则取实际峰值。这时误差为:

$$a_7=1\%$$

3.8 冲击例子

转换装置:阻尼电容分压器,正常比 1 066.7,高压为油纸电容器(397pF),但不为聚酯电容器。

测量仪表:峰值电压表的不确定系数=0.5%,刻度系数= $\pm 50 \times 10^{-6}/K$,运行温度 $5^\circ C \sim 55^\circ C$ 。

(1)刻度因数的总不确定度 u_1 与标准偏差

S 在性能试验中用 500kV 标准测量系统比对, $u_1=0.8\%$, $S=0.12\%$,刻度因数(相对)=0.997。

(2)测量系统在量程 100kV 到 400kV 下的非线性度 a_1 用标准测量系统比对 (5 个电压级次,每级冲击 5 次)。见表 A-2。

$$F_M=0.9994; a_1=0.66\% (1.006 \sim 0.9994)$$

(3)测量系统的短期稳定性用标准测量系统比对:

试验起始的刻度因数: $F_{m \text{ 始}}=0.997$

试验终了的刻度因数: $F_{m \text{ 终}}=0.994$

表 A-2 测量系统刻度因数

电压级次(标准系统)/kV	测量系统的刻度因数(相对)
100	1.006
180	1.004
240	0.996
320	0.994
400	0.997

$$a_2=0.15\%$$

(4)温度效应:

制造厂已经给信息,因此 a_3 用估计

转换装置温度范围: $T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=25^{\circ}\text{C}$

峰值表的温度范围: $T_{\min}=15^{\circ}\text{C}$, $T_{\max}=30^{\circ}\text{C}$

转换装置的温度系数:高压臂: $C_{\text{H}}\approx 0.1\%/K$

低压臂: $C_{\text{L}}\approx 0.05\%/K$

因此 $a_3\approx 0.375\%$

测量仪器: $C_{\text{MI}}=\pm 50\times 10^{-6}/K$

估计 $I_{\text{M}}=0.05\%$, 则 $a_{3\text{M}}=0.125\%$

用 I_{M} 估计 $a_{3\text{M}}$ 过于悲观,但差别可以忽略。

(5)邻近效应:

不用接标准分压器比对,借助施加恒定数值冲击 320kV,其恒定及基于点火瞬间恒定的充电电压,每个位置 10 次,见表 A-3。

$$a_4=0.34\%$$

(6)长期稳定性(a_5):

按 IEC60060-2,对测量系统以前无性能试验,然而 3 年以后性能试验得到的刻度因数为 0.997, $a_5=0.3\%$ 。

(7)过正常期刻度因数的变化(a_6):

冲击电压不同波前 T_1 给出刻度因数如表 A-4。

$$a_6=0.30\%$$

估计冲击峰值的不确定度

(8)冲击峰值不确定度 a_7 :

$a_7=0$ 对光滑冲击

$a_7=1\%$ 对冲击过冲小于 $1\mu\text{s}$ 或等效振荡。

对圆滑冲击:对测量刻度为 95%的总测量不确定度(μ_{tot})

$$\mu_{\text{tot}}=\pm 1.38\% \text{ 进升到 } \pm 1.4\%$$

对有过冲冲击: $\mu_{\text{tot}}=\pm 1.8\%$

附录:邻近效应

对未屏蔽的电容式、阻尼电容式或电阻式分压器用于冲击截波,邻近效应应予考虑。

刻度因数在下列三种状况下建议为:

(1)刻度因数由标准测量系统比对决定,给出电压读数 A_1 。

(2)分压器用最短引线连至被试品,它位于对变压器或发生器近而与试验室墙壁很远,此条件提供了对带电体的极高的杂散电容与试验室墙壁尽可能远的极低电容,此条件给出电压读数 A_2 。

(3)分压器用最长引线连至被试品,它位于对变压器或发生器远,与对试验室墙尽可能的近。这条件给出对带电体极小的杂散电容与对地极大的对地电容。此条件给出电压读数 A_3 。

选择这些条件将考虑到各种试验安排,而与其试验电压值无关。刻度因数将决定于这三种常数

表 A-3 邻近效应试验结果

分压器的位置		读数(平均值)	
性能试验 间隙	对带电部分 4m	$A_1=321.5\text{kV}$	$F_{\text{m}}=1.000$
	对墙 5m		
最小 间隙	对带电部分 1.5m	$A_2=322.2\text{kV}$	$F_1=0.998$
	对墙 5m		
最小 间隙	对带电部分 6m	$A_3=320.4\text{kV}$	$F_2=1.0034$
	对墙 2m		
	$a_4=0.34\%$		

表 A-4 刻度因数

冲击波前 $T/\mu\text{s}$	刻度因数(相对)
0.85	1.001
1.15	0.996
1.64	0.995

值的条件,抑或用标准测量系统或认可测量系统比对。当充电在研究系统时,上述布置以比对测量系统的测量回路要保持不变。即可选比对测量系统在变压器低压侧为固定电压或发生器充电电压为固定电压。

分压器的邻近效应可得到:

$$F_1 = A_1 / A_2 (\text{对最小刻度因数})$$

$$F_2 = A_1 / A_3 (\text{对最大刻度因数})$$

刻度因数与 1 有较大差别,如刻度因数小于 1%,则可插入 3.4 节,若大于 10%,则不满足 IEC60060-2 的要求,对应的应用范围要受限制。

当此分压器验收试验不在交货时进行,而安排在试验室进行,其结果要记入“性能试验记录”内。

附录 B 测量系统测量不确定度的分析和评定

1 概述

近二十多年来,各国大力开展了测量的不确定度评定方面的研究工作。1993 年国际标准化组织(ISO)以七个国际组织的名义联合发布了《Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement》(测量不确定度表示指南,以下简称 GUM),为测量不确定度的评定和表示提供了统一的准则。GUM 得到了普遍的推广和应用。我国于 1999 年发布了国家计量技术规范 JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》,原则上等效采用了 ISO 的 GUM。

GUM 是由国际计量局(BIPM)、国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)、国际法制计量组织(OIML)、国际理论和应用物理联合会(IUPAP)、国际理论和应用化学联合会(IUPAC)和国际临床化学委员会(IFCC)等七个权威性的国际组织联合发布的,因而是有约束力的。我国在参加国际比对所给出的数据上,在进口仪器验收以及计量机构出具的校准证书和校准数据都要求给出测量结果的不确定度。在计量标准考核的建标报告中要求给出整套计量标准装置或系统的不确定度。在国家标准 GB/T 15481-2000《检测和校准实验室能力的通用要求》中,明确规定了无论是校准实验室还是检测实验室,都应该对校准和检测结果进行不确定度评定。对测量结果进行不确定度评定已经成为变压器试验室必不可少的一项重要工作。

在以往的计量其他测试工作中,一直习惯于对测量结果作误差分析和评定。而采用不确定度评定和表示,并不仅仅是将“误差”一词改用“不确定度”这么简单的事情,而是在评价测量结果及其表示上有重要的概念的改变,这是传统误差理论和实践的新发展结果。用不确定度来统一评价测量结果使不同领域对测量结果的处理有了统一的方法,进而使各测量结果之间有了可比性。

2 测量不确定度的评定步骤

2.1 确定测量的方法

每一项测量都要先确定测量的方法和测量程序,因为同一项测量可以有不同的测量方法和测量程序,不同的测量方法和测量程序的数学模型、测量不确定度的评定会有很大的不同。测量方法和测量程序是按实际测量来确定。

2.2 建立满足测量不确定度评定所需的数学模型

测量中,被测量 Y (即输出量)由 N 个其他量 X_1, X_2, \dots, X_N , 通过函数关系 f 来确定,即:

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (\text{B-1})$$

式中, X_N 是对测量结果 y 产生影响的影响量(即输入量)。式(B-1)称为测量模型或数学模型。

数学模型是在测量结果的计算公式基础上,考虑了所有对测量结果影响较小而在计算公式中被忽略但却对测量不确定度有影响的影响量(即所有的测量不确定度来源)而建立的。它既能用来计算测量结果,又能用来全面地评定测量结果的不确定度。输入量并不是全部都可以通过实验反复多次进行测量而得到,实际上有不少输入量来源于不同资料 and 信息的估计值。

2.3 确定各输入量的估计值

数学模型函数表示式中的所有自变量即是该测量的输入量。输入量的大小不仅会影响到测量结果,有时还会通过灵敏系数而对测量不确定度有影响,因此尽可能准确地给出各输入量的估计值是十分重要的。

输入量 X_i 的估计值 x_i 既可以从本次测量中通过直接观测得到,也可以由其他来源得到,例如校准证书、通用校准证书、通用数据表、各种手册和以前观测到的数据等。

2.4 确定各输入量的标准不确定度及其相应的灵敏系数

有些输入量的估计值是直接由多次测量通过取平均值得到的,可以用统计方法来评定其标准不确定度,即 A 类不确定度评定。有些输入量的估计值则是由其他方法得到的,其标准不确定度要用非统计方法来评定,即 B 类不确定度评定。

当各输入量相互独立无关或各输入量之间的相关性可以忽略的情况下,对应于输入量 x_i 的灵敏系数 c_i 为:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (\text{B-2})$$

在某些情况下,灵敏系数 c_i 也可由实验测定。

2.5 列出不确定度分量一览表

列出全部测量不确定度分量一览表有利于对测量不确定度评定进行分析、检查、比较和交流,可以立即看出哪些输入量的不确定度对测量结果的不确定度起主要作用。

对不确定度分量一览表的一般要求是无遗漏地列出所有测量不确定度分量,内容可包括不确定度分量的来源、输入量的估计值及其标准不确定度、灵敏系数、自由度以及其他需要说明的问题。

2.6 评定合成标准不确定度

在得到各输入量 x_i 的标准不确定度 $u(x_i)$ 及其相应的灵敏系数 c_i 后,就可以计算出对应于各输入量的不确定度分量 $u_i(y)$ 。再根据不确定度传播律来计算测量结果的合成标准不确定度:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (\text{B-3})$$

计算合成标准不确定度的有效自由度 ν_{eff} 。

2.7 给出扩展不确定度

将测量结果的合成不确定度乘以包含因子 k 就可以得到扩展不确定度 $U = k \cdot u_c(y)$ 。

如判断 Y 接近于正态分布,应根据有效自由度 ν_{eff} 和所要求的置信概率 p ,由 t 分布临界值表得到包含因子 $k_p = t_p(\nu_{\text{eff}})$ 。此时,扩展不确定度用 U_p 表示:

$$U_p = k_p \cdot u_c(y)$$

2.8 提出测量不确定度评定报告

这一步骤是提供正式的测量结果及其测量不确定度,是编写各种与测量有关的文件例如校准证书、检测证书、说明书、技术规范和实验报告等所必需的。

以上介绍了测量不确定度评定的一般步骤。对于不同的测量工作,在进行测量不确定度评定时,个体问题可能会有很大的差异,不必照搬。

图 B-1 是测量不确定度的评定程序框图,框图中清晰地表示出了测量不确定度评定的一般过程,认真看此框图对于理解评定的整个过程是有益的。

3 变压器测量不确定度分析和评定的特点及处理方法

变压器试验中,主要的测量系统有交流高电压测量系统、冲击高电压测量系统、功率(损耗)测量系统和强电流测量系统等。随着国家检测实验室认可和企业质量保证体系认证工作的进一步开展和用户试验质量要求的提高,测量系统的不确定度评定已越来越成为变压器试验室必不可少的一项重要工作。

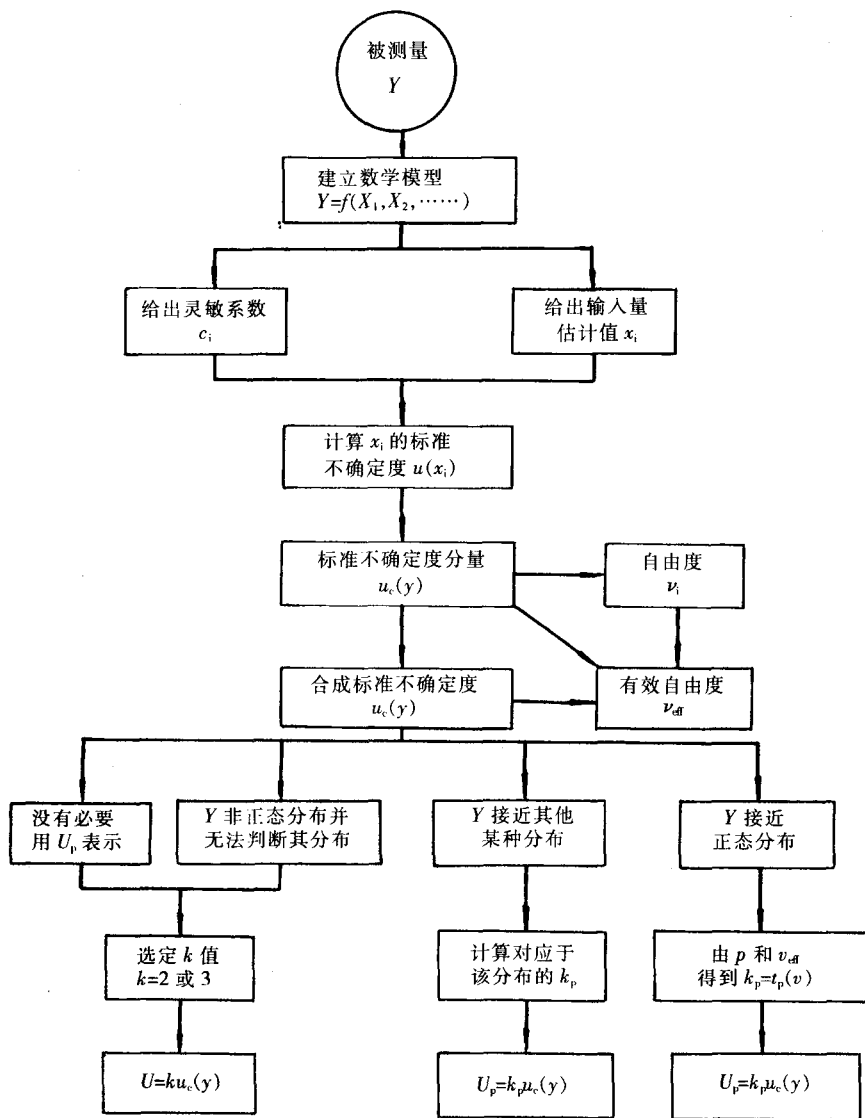


图 B-1 测量不确定度评定程序框图

根据 GUM 和 JJF1059—1999 标准规定,测量不确定是针对测量结果而言的,仪器和测量系统的不确定度并没有定义。仪器和测量系统的不确定度可以理解为测量结果的不确定度中由仪器和测量系统所引入的测量不确定度分量。

变压器试验中测量系统不确定度评定可以根据国家计量技术规范 JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》、国家标准 GB/T 16927.2—1997《高电压试验技术 第二部分 测量系统》的规定来进行。变压器试验中被测量往往是高电压、大电流,它们的稳定性较差、波动较大,有的还是瞬态信号,很难进行重复性条件下的校准试验,所以,变压器试验测量系统的不确定度评定有它不同于其他测量的特点。

(1)变压器试验中交流高电压测量系统,由于交流高压电源输出的高电压不稳定、波动大(因电网或设备原因),很难进行重复性条件下的试验。这种情况下,引入了测量系统刻度因数的概念。GB/T 16927.2—1997 标准对此作了详细的规定。

测量系统的刻度因数 F 定义为“乘以仪器的读数便得到被测量值的系数”。即:

$$F = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{B-4})$$

式中 V_1 ——测量系统高压端的被测电压;

V_2 ——指示仪表的读数。

可以看出,尽管高压端的被测电压 V_1 是波动的,但只要测量系统的刻度因数是稳定的,则 V_2 也随着向相同的方向变化;这样, F 的校准中排除了被测电压波动的影响。只要在同一高电压下,进行大于 10 次以上的测量,可以认为符合重复性条件的要求, F 的重复性误差就可以用 A 类评定。

测量系统的标定刻度因数可以采用和标准测量系统相比对的方法确定。

试验时同时读取两个测量系数的读数。由标准测量系统得到的读数通过计算得到输入量(高压端电压 V_1),再除以被试测量系统的仪表读数,就得到系统标定刻度因数 F 值。试验要重复 n 次 ($n \geq 10$),可得到 n 个独立读数 F_i 。取平均值 F_m 作为系统标定刻度因数。

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (\text{B-5})$$

$$\text{其实验标准差为 } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2}{n-1}} \quad (\text{B-6})$$

GB/T 16927.2—1997 标准要求 S 应小于 F_m 的 1%。

计算得到的实验标准差即可作为标准不确定度 A 类评定的数据。

交流电压的比对测量,既可施加一次试验电压,读取 n 次读数,也可施加 n 次试验电压读取的每次读数。

(2)需要指出的是,在高电压测量的校准中用于比对的标准测量系统的不确定度很难小于被测系统不确定度的 $1/3$,所以,确定测量系统刻度因数的试验中,用于比对的标准测量系统的不确定度必须作为不确定度分量计入合成不确定度。这一点和一般仪表的检定、校准有很大的不同。一般仪表的检定、校准所用的标准器的不确定度常常小于被检仪表不确定度的 $1/3$ 。

(3)测量系统的刻度因数由转换装置的刻度因数(分压器的分压比、互感器的变比等)和测量仪表的刻度因数相乘得到。如果,在不确定度分量的评定中根据测量系统制造厂商提供的校准证书等技术文件已经计入了标准测量系统的不确定度,则仅仅考核被测测量系统重复性误差的比对试验,不再考虑标准测量系统的不确定度。

(4)变压器试验中的雷电冲击高电压测量系统,由于被测量是单次瞬态电压,需要一次次施加试验电压,其施加电压的分散性又很大,所以,也采用(1)~(3)的方法,与标准冲击测量系统相比对进行校准。对于雷电冲击测量系统比对校准,必须施加 n 次冲击电压,读取每次读数。刻度因数 F 及其实验标准差 S 的计算方法和交流高电压测量系统的校准相同。

(5)对于数字显示测量仪器和数字记录仪,如其分辨力为 δx ,因分辨力产生的最大误差为 δx 的一半。 x_i 的分布一般可近似地估计为矩形分布,则由此带来的标准不确定度为:

$$u(x) = \frac{\frac{1}{2} \delta x}{\sqrt{3}} = 0.29 \delta x \quad (\text{B-7})$$

对于测量波形用的数字记录仪、数字示波器,一般分辨力指标用二进位的比特数(bit) N 来表示,它表示二进位的位数。这时,它的最低有效位(LSB)就等于 δx ,即

$$\delta x = \frac{1}{2^N}$$

$$u(x) = \frac{1}{\sqrt{3} \times 2^{N+1}} \quad (\text{B-8})$$

对于所引用的已修约的值,如其修约间隔为 δx ,则因此导致的标准不确定度也为

$$u(x) = 0.29 \delta x \quad (\text{B-9})$$

(6)当测量仪器检定证书上给出准确度级别时,可按检定系统或检定规程所规定的该级别的最大允许误差与其他信息进行评定。如果对分布情况没有任何信息时,较合理的估计是将其近似看作为矩形分布,此时包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。假定最大允许误差为 $\pm A$,则示值允差引起的标准不确定度分量为:

$$u(x) = \frac{A}{\sqrt{3}} \quad (\text{B-10})$$

以“级”使用的仪器,按上面计算得到的不确定度分量并没有包含上一个等别仪器对所使用级别仪器进行检定带来的不确定度,因此,当上一级别检定的不确定度不可忽略时,还要考虑这一项不确定度分量。

(7)当测量仪器检定证书上给出准确度等别时,可按检定系统或检定规程所规定的该等别的测量不确定度大小,按 B 类和正态分布或 t 分布进行评定。

(8)在测量不确定度的评定时,应该对测量中导致测量不确定度的来源进行认真地分析,既不遗漏也不重复计算某些测量不确定度分量。

(9)并不是每一次测量都一定同时有 A 类评定不确定度和 B 类评定不确定度。根据实际情况,可以只有 A 类评定不确定度,也可以只有 B 类评定不确定度,当然也可以两者兼而有之。有些不确定度分量,根据评定方法的不同,既可以用 A 类评定来处理,也可以用 B 类评定来处理。

4 交流高电压测量系统不确定度评定实例

某高电压试验站的工频交流高电压测量系统由电容分压器、传输电缆和交流峰值电压表组成,电容分压器的额定电压为 750kV,其高压臂为高压标准电容器,低压臂为低压侧电容和传输电缆电容的和。交流峰值电压表预置入电容分压器的分压比后,直接显示高压端的电压值。

4.1 测量方法

测量方法见图 B-2。

V_1 为被测交流高电压, V_2 为 C_1 、 C_2 组成的分压器的二次电压,则

$$V_1 = k \cdot V_2$$

式中 C_1 ——高压标准电容器, 410.8pF, $\pm 0.05\%$ 电桥测得;

C_2 ——低压臂电容器, 4 107 580pF (包括电缆电容), $\pm 0.01\%$ 电桥测得;

k ——高压分压比,制造厂的测试报告提供测试数据为 10 000;

用瑞士 $\pm 1\%$ 3370/800/50 分压器进行比对最大误差为 0.9%,所用的 AC 精密峰值电压表最大允许误差为 $\pm 0.5\%$ 。

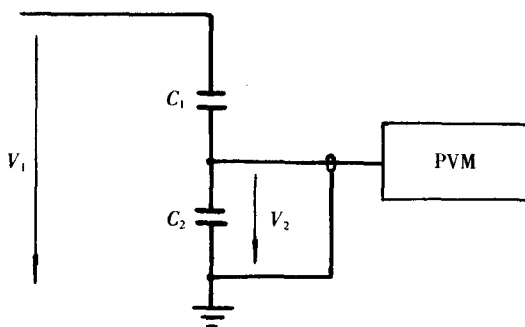


图 B-2 AC 高电压测量系统框图

PVM——AC 精密峰值电压表, $\pm 0.5\% \times \text{量程} \pm 1$ 个数字。

4.2 数学模型

高压端交流电压是用 AC 峰值电压表测量分压器低压侧电压得到的, 它的数学模型为:

$$V_1 = F \cdot V_2$$

式中, F 为测量系统的刻度因数。 V_2 为低压侧的电压表的示值, 分压器的分压比已预置在电压表中, 示值 V_1 实际上是分压比和低压侧实际电压值的乘积。

4.3 测量不确定度来源分析

影响交流高电压测量结果的不确定度来源主要有以下因素:

- (1) 电容分压器分压比不准引入的不确定度;
- (2) 比对标准引入的不确定度;
- (3) AC 精密峰值电压表幅值不准引入的不确定度;
- (4) AC 精密峰值电压表分辨力引入的不确定度;
- (5) 交流高电压重复性测量引入的不确定度。

4.4 标准测量不确定度评定

4.4.1 分压比不准引入的测量不确定度

制造厂的测试报告提供的测试数据是用比对方法得到的, 分压比最大误差是 $\pm 0.9\%$, 按矩形分布, 高压分压比不准确引入的不确定度为

$$u_1 = \frac{0.9}{\sqrt{3}} = 0.52\%$$

根据经验判断 u_1 具有 80% 的可信度, 其不可信度 $\sigma(u_1)/u_1 = 20\%$, 得 u_1 的自由度为

$$\nu_1 = \frac{1}{2} [\sigma(u_1)/u_1]^2 = 12.5$$

4.4.2 比对标准引入的不确定度

用于比对的瑞士制造 3370/800/50 高压标准电容器的分压比最大误差为 $\pm 1\%$, 按矩形分布计算, 比对标准引入的不确定度为

$$u_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

因为, 测量值全部落在 $-a_1$ 到 $+a_1$ 区间内, 所以 u_2 的自由度

$$\nu_2 \rightarrow \infty$$

4.4.3 AC 精密峰值电压表幅值不准引入的不确定度

AC 精密峰值电压表最大误差为 $\pm 0.5\%$, 按矩形分布, 电压表幅值不准引入的不确定度为

$$u_3 = \frac{0.5\%}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

根据经验判断 u_3 具有 80% 的可信度, 其不可信度 $\sigma(u_3)/u_3 = 20\%$, 得 u_3 的自由度为

$$\nu_3 = \frac{1}{2} [\sigma(u_3)/u_3]^2 = 12.5$$

4.4.4 AC 精密峰值电压表分辨力引入的不确定度

$3\frac{1}{2}$ 位数字表在 1 000kV 时分辨力为 1kV, 末位有 ± 1 个数字的跳动, 所引入的最大误差为 0.1%, 按均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 电压表分辨力引入的不确定度为

$$u_4 = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.058\%$$

u_4 的自由度为: $\nu_4 \rightarrow \infty$

4.4.5 交流高电压测量系统重复性测量引起的不确定度

因为高电压交流试验变压器输出的交流高电压波动较大,很难固定在一个电压下进行多次测量,以获得重复性条件下的测量不确定度数据。在这种情况下,可以依据 GB/T 16927.2—1997 标准规定的确定整个测量系统标定刻度因数的方法,进行交流电压测量系统刻度因数及其实验标准差的试验。

实际试验取 $n=15$, V_m 约为 90kV,得:

刻度因数 F_i : 0.998 3, 0.992 3, 0.989 5, 0.995 8, 0.988 0, 0.993 3, 0.988 3, 0.993 8, 0.993 7, 0.992 6, 0.997 2, 0.993 4, 0.997 3, 0.989 4, 0.979 5。

算得标定刻度因数为

$$F_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i = 0.992\ 2$$

其实验标准差为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_m)^2}{n-1}} = 0.48\%$$

表示为相对形式

$$\frac{S}{F_m} = 0.48\%$$

对 F_m 的标准不确定度为

$$u_5 = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{0.48}{\sqrt{15}} = 0.12\%$$

u_5 的自由度

$$\nu = n - 1 = 14$$

以上标准不确定度分量见表 B-1。

表 B-1 标准不确定度分量

标准不确定度分量	测量不确定度来源	标准不确定度/%	自由度	类型
u_1	分压比不准	0.52	12.5	B
u_2	分压比比对标准的不确定度	0.58	∞	B
u_3	AC 峰值电压表不准	0.29	12.5	B
u_4	AC 峰值电压表分辨力	0.058	∞	B
u_5	测量系统重复性	0.12	14	A

4.5 合成标准不确定度评定

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = \sqrt{(0.52\%)^2 + (0.58\%)^2 + (0.058\%)^2 + (0.29\%)^2 + (0.12\%)^2} = 0.84\%$$

u_c 的有效自由度为

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^5 \frac{u_i^4}{\nu_i}} = \frac{0.84^4}{\frac{0.52^4}{12.5} + \frac{0.58^4}{\infty} + \frac{0.29^4}{12.5} + \frac{0.058^4}{\infty} + \frac{0.12^4}{14}} = 77$$

4.6 扩展不确定度评定

4.6.1 确定包含因子 k 值

按 $p=95\%$, $\nu_{\text{eff}}=77$, 查 t 分布值表后计算得

$$t_{95}(\nu_{\text{eff}}=77)=1.996$$

所以

$$k=1.996$$

4.6.2 确定扩展不确定度 U_{95}

$$U_{95}=k u_c=1.996 \times 0.84\%=1.7\%$$

所以, 高电压试验站的交流电压测量的扩展不确定度 U_{95} 为

$$U_{95}=1.7\% (k=1.996)$$

5 功率测量不确定度评定实例

某高电压试验站用于变压器空载损耗、负载损耗试验的测量系统使用互感器三瓦特表法, 由电压互感器、电流互感器、电压表、电流表和瓦特表连接组成。由于被测量经互感器变换后接入测量系统, 由互感器角差引入的标准不确定度分量不可忽略, 且与被测功率的功率因数有关。被测功率的功率因数越小, 由互感器角差引入的标准不确定度分量越大, 甚至大大超过测量仪表数值误差引起的不确定度分量。所以, 不确定度评定情况比较复杂。

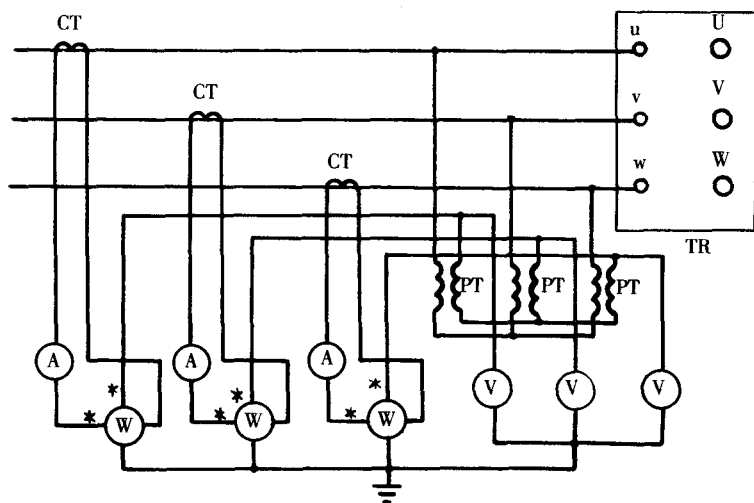


图 B-3 三相变压器损耗互感器三瓦特表法测量接线图

TR—被试变压器 CT—电流互感器 PT—电压互感器

W—低功率因数瓦特表 A—电流表 V—电压表

5.1 测量方法

测量方法见图 B-3。使用互感器三瓦特表法。

5.2 数学模型

三相变压器使用互感器三瓦特表法测量损耗时, 三相的电流相等且对称, 三相损耗等于三个相损耗之和。

$$P_{3W}=W_u+W_v+W_w=U_u I_u \cos \varphi_u + U_v I_v \cos \varphi_v + U_w I_w \cos \varphi_w = 3UI \cos \varphi$$

三相损耗测量的绝对误差为

$$\Delta P_{3W}=3U \cos \varphi \cdot \Delta I + 3I \cos \varphi \cdot \Delta U - 3U \sin \varphi \cdot \Delta \varphi$$

三相损耗测量的相对误差为

$$\beta_3 = \frac{\Delta P_{3W}}{P_{3W}} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} - \Delta \varphi \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = K_1 - K_2 \tan \varphi (\%)$$

式中 K_1 ——电压、电流、功率数值测量误差引起的相对误差, 与功率因数无关;

K_2 ——电压、电流、功率测量的角差引起的相对误差, 如 $\Delta \varphi$ 变换为以“分”表示的角差 δ 时, 则

$$K_2 = \Delta \varphi = 0.0291 \delta$$

$$\delta = \delta_u + \delta_i + \delta_w$$

式中 δ_u, δ_i ——电压、电流互感器的角差;

δ_w ——瓦特表的角差。

这些角差引起的测量误差与功率测量时的功率因数 $\cos\varphi$ 的大小有关。

5.3 测量不确定度分析

电压、电流互感器为 0.05 级,角差为 $2'$;电压表为 1.0 级;电流表为 0.5 级;瓦特表为 0.5 级,角差为 $1.71'$ 。

(1)测量设备数值误差引入的不确定度:

- ①电压互感器比差引入的不确定度;
- ②电流互感器比差引入的不确定度;
- ③电压表误差引入的不确定度;
- ④电流表误差引入的不确定度;
- ⑤瓦特表数值误差引入的不确定度。

(2)测量设备的角差引入的不确定度:

- ①电压互感器角差引入的不确定度;
- ②电流互感器角差引入的不确定度;
- ③瓦特表的角差引入的不确定度。

5.4 标准测量不确定度评定

5.4.1 测量设备数值误差引入的不确定度

5.4.1.1 电压互感器比差引入的不确定度

电压互感器为 0.05 级,检定证书的数据表明,在量程的 20%~120%时比差小于 $\pm 0.05\%$ 。考虑按矩形分布计算,概率 $p=100\%$, $k=\sqrt{3}$,故电压互感器比差引入的不确定度为:

$$u_1 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029\%$$

因为,检定证书提供的数据表明,测量值全部落在 $-a_1$ 到 $+a_1$ 区间内,所以 u_1 的自由度 $\nu_1 \rightarrow \infty$ 。

5.4.1.2 电流互感器比差引入的不确定度

电流互感器为 0.05 级,检定证书的数据表明,在量程的 20%~120%时比差小于 $\pm 0.05\%$ 。考虑按矩形分布计算,概率 $p=100\%$, $k=\sqrt{3}$,故电流互感器比差引入的不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029\%$$

因为,检定证书提供的数据表明,测量值全部落在 $-a_1$ 到 $+a_1$ 区间内,所以 u_2 的自由度 $\nu_2 \rightarrow \infty$ 。

5.4.1.3 电压表误差引入的不确定度

电压表为 1.0 级,其最大误差为 $\pm 1\%$ 。按矩形分布计算,置信概率 $p=100\%$, $k=\sqrt{3}$,故电压表误差引入的不确定度为:

$$u_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58\%$$

根据经验判断 u_3 具有 80%的可信度,其不可信度 $\sigma(u_3)/u_3=20\%$,得 u_3 的自由度为

$$\nu_3 = \frac{1}{2} [\sigma(u_3)/u_3]^2 = 12.5$$

5.4.1.4 电流表误差引入的不确定度

电流表为 0.5 级,其最大误差为 $\pm 0.5\%$ 。按矩形分布计算,置信概率 $p=100\%$, $k=\sqrt{3}$,故电流表误差引入的不确定度为:

$$u_4 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

根据经验判断 u_4 具有 80% 的可信度,其不可信度 $\sigma(u_4)/u_4=20\%$,得 u_4 的自由度为

$$\nu_4 = \frac{1}{2} [\sigma(u_4)/u_4]^2 = 12.5$$

5.4.1.5 瓦特表误差引入的不确定度

瓦特表为 0.5 级,其最大误差为 $\pm 0.5\%$ 。按矩形分布计算,置信概率 $p=100\%$, $k=\sqrt{3}$,故瓦特表误差引入的不确定度为:

$$u_5 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\%$$

根据经验判断 u_5 具有 80% 的可信度,其不可信度 $\sigma(u_5)/u_5=20\%$,得 u_5 的自由度为

$$\nu_5 = \frac{1}{2} [\sigma(u_5)/u_5]^2 = 12.5$$

5.4.2 测量设备的角差引入的不确定度

测量设备的角差如表 B-2。

表 B-2 测量设备的角差

测量设备名称	测量设备型号	最大允许角差(')	备注
电压互感器	HJ-12	2.0	
电流互感器	HL-28	2.0	
低功率因数瓦特表	D52	1.71	

5.4.2.1 电压互感器的角差引入的不确定度

从国家标准《测量用电压互感器》中查到,0.05 级电压互感器的最大允许角差为 2'。其最大相对误差为

$$E_6 = 0.0291 \cdot \delta \cdot \tan \varphi$$

按矩形分布计算,置信概率 $p=100\%$, $k=\sqrt{3}$,故角差引入的不确定度为:

$$u_6 = \frac{0.0291 \cdot \delta \cdot \tan \varphi}{\sqrt{3}}$$

不同功率因数下电压互感器角差引入的最大误差和标准不确定度如表 B-3。

表 B-3 不同功率因数下电压互感器角差引入的最大误差和标准不确定度

$\cos \varphi$	$\tan \varphi$	$E_6/\%$	$u_6/\%$
0.5	1.732	0.100 8	0.058 2
0.4	2.291	0.133 3	0.077 0
0.3	3.180	0.185 1	0.106 9
0.2	4.899	0.285 1	0.164 6
0.1	9.950	0.579 1	0.334 3
0.08	12.460	0.725 2	0.418 7
0.06	16.637	0.968 3	0.559 0
0.04	24.980	1.453 8	0.839 4
0.03	33.318	1.939 1	1.119 6
0.02	49.990	2.909 4	1.679 8
0.01	99.995	5.819 7	3.360 0

根据经验判断 u_6 具有 80% 的可信度, 其不可信度 $\sigma(u_6)/u_6=20\%$, 得 u_6 的自由度为

$$\nu_6 = \frac{1}{2} [\sigma(u_6)/u_6]^2 = 12.5$$

5.4.2.2 电流互感器的角差引入的不确定度

从国家标准《测量用电流互感器》中查到, 0.05 级电流互感器的最大允许角差为 $2.0'$ 。按上述方法计算, 不同功率因数下电流互感器角差引入的最大误差和标准不确定度如表 B-4。

表 B-4 不同功率因数下电流互感器角差引入的最大误差和标准不确定度

$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$E_7/\%$	$u_7/\%$
0.5	1.732	0.100 8	0.058 2
0.4	2.291	0.133 3	0.077 0
0.3	3.180	0.185 1	0.106 9
0.2	4.899	0.285 1	0.164 6
0.1	9.950	0.579 1	0.334 3
0.08	12.460	0.725 2	0.418 7
0.06	16.637	0.968 3	0.559 0
0.04	24.980	1.453 8	0.839 4
0.03	33.318	1.939 1	1.119 6
0.02	49.990	2.909 4	1.679 8
0.01	99.995	5.819 7	3.360 0

根据经验判断 u_7 具有 80% 的可信度, 其不可信度 $\sigma(u_7)/u_7=20\%$, 得 u_7 的自由度为

$$\nu_7 = \frac{1}{2} [\sigma(u_7)/u_7]^2 = 12.5$$

5.4.2.3 瓦特表的角差引入的不确定度

D52 瓦特表的角差为 $1.71'$, 按上述方法计算, 不同功率因数下瓦特表角差引入的最大误差和标准不确定度如表 B-5。

表 B-5 不同功率因数下瓦特表角差引入的最大误差和标准不确定度

$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$E_8/\%$	$u_8/\%$
0.5	1.732	0.086 2	0.049 8
0.4	2.291	0.114 0	0.065 8
0.3	3.180	0.158 2	0.091 3
0.2	4.899	0.243 8	0.140 8
0.1	9.950	0.495 1	0.285 8
0.08	12.460	0.620 0	0.358 0
0.06	16.637	0.827 8	0.478 0
0.04	24.980	1.243 0	0.717 6
0.03	33.318	1.658 0	0.957 2
0.02	49.990	2.487 5	1.436 2
0.01	99.995	4.975 9	2.872 8

根据经验判断 u_8 具有 75% 的可信度, 其不可信度 $\sigma(u_8)/u_8=25\%$, 得 u_8 的自由度为

$$\nu_8 = \frac{1}{2} [\sigma(u_8)/u_8]^2 = 8$$

5.5 合成标准不确定度评定

由于上述标准不确定度都互不相关,故合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2}$$

计算得到的标准不确定分量和合成标准不确定度见表 B-6、表 B-7。

表 B-6 标准不确定度分量

标准不确定度分量	测量不确定度来源	标准不确定度	自由度	类型
u_1	电压互感器比差	0.058%	∞	B
u_2	电流互感器比差	0.058%	∞	B
u_3	电压表误差	0.58%	12.5	B
u_4	电流表误差	0.29%	12.5	B
u_5	瓦特表数值误差	0.29%	12.5	B
u_6	电压互感器的角差	参见表 B-3	12.5	B
u_7	电流互感器的角差	参见表 B-4	12.5	B
u_8	瓦特表的角差	参见表 B-5	8	B

表 B-7 不同功率因数下变压器损耗测量的合成标准不确定度和扩展不确定度

$\cos\varphi$	u_c	k_{95}	$U_{95}/\%$
0.5	0.726 3	2.06	1.50
0.4	0.731 1	2.06	1.51
0.3	0.741 3	2.06	1.53
0.2	0.769 7	2.06	1.59
0.1	0.907 5	2.06	1.87
0.08	0.998 6	2.06	2.06
0.06	1.171 2	2.06	2.41
0.04	1.562 8	2.06	3.22
0.03	1.985 4	2.06	4.09
0.02	2.867 9	2.06	5.91
0.01	5.599 2	2.06	11.53

u_c 的有效自由度为:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^8 \frac{u_i^4}{\nu_i}}$$

在不同 $\cos\varphi$ 下计算 u 的有效自由度 ν_{eff} 均大于 27。

5.6 扩展不确定度评定

5.6.1 确定包含因子 k 值

当置信概率 p 一定,自由度越小,则 k_p 越大,此时求得的 u_p 越可靠,所以可按 $p=95\%$, $\nu_{\text{eff}}=25$, 查 t 分布值表得

$$t_{95}(\nu_{\text{eff}}=25)=2.06$$

所以

$$k_{95}=2.06$$

5.6.2 评定扩展不确定度 U_{95}

$$U_{95}=k_{95}u_c=2.06 \times u_c$$

按上式计算在不同 $\cos\varphi$ 下变压器损耗测量的扩展不确定度 U_{95} , 结果见表 B-7。

经过不确定度的评定可以找到对测量系统的测量不确定度贡献大的影响量, 以便针对具体情况改善测量系统的不确定度。从这个实际例子看到, 随着功率因数 $\cos\varphi$ 变小, 由互感器角差引入的不确定度分量大大增加, 所以, 减少互感器的角差是改善功率测量系统不确定度的关键。从国家标准《测量用电压互感器》、《测量用电流互感器》中查到, 0.05 级互感器的最大允许角差为 $2'$, 而 0.01 级互感器的最大允许角差仅为 $0.3'$ 。这样, 计算后可知, 在 $\cos\varphi 0.01$ 时电压、电流互感器由 0.05 级提高为 0.01 级后, 由互感器角差引入的不确定度分量约可减小为原来的 $1/5$ 。这时, 瓦特表的最大角差 ($1.71'$) 就成为对测量系统的测量不确定度贡献较大的影响量了。采用角差很小的变压器损耗测试系统或功率分析仪代替瓦特表, 可将功率测量的不确定度进一步减小。

附录 C 电力变压器的保护和故障录波装置

1 电力变压器的保护

电力变压器如出现故障,将使供电可靠性和系统的正常运行受到极大影响,因此,必须按照变压器容量大小及重要程度,设置性能良好,动作可靠的保护装置。

变压器的故障一般分为内部和外部故障两类:内部故障主要是绕组的相、匝间短路,主绝缘对地击穿,铁心烧损等。这类故障均是突发性性质,由于故障时强大电弧能量,使绝缘材料烧损,绝缘油剧烈分解气化,如不及时切除,将会使油箱爆破,引发火灾,危害严重。外部故障主要是套管爆炸、损坏和输电线上发生短路和接地,使得变压器内部出现过电流或电压。

其次,变压器的非正常运行,如过负荷,过激磁以及大面积漏油使油面严重降低等。

根据上述情况,变压器应设置保护。保护种类有以下几类。

1.1 变压器的纵差动保护

对变压器内部及套管至各侧断路器间的连线出现故障均可用纵差动保护,纵差动保护适用于:

- (1)并列运行的变压器,容量 6 300kVA 以上;
- (2)单独运行的变压器,容量 10 000kVA 以上;
- (3)发电厂厂用变压器,容量 6 300kVA 以上;
- (4)工业企业中重要的变压器,容量 6 300kVA 以上。

1.1.1 纵差动保护的原理接线

电力变压器绕组有双绕组和三绕组结构,由于高、低压绕组的额定电流不同,纵差动保护的接线亦不同,如图 C-1 所示,为使纵差动保护正确动作,正常运行时,必须使两侧互感器的二次电流平衡相等。

$$I_2' = I_2'' = \frac{I_1'}{K_{11}} = \frac{I_1''}{K_{12}}$$

$$\frac{K_{12}}{K_{11}} = \frac{I_1''}{I_1'} = K_B$$

式中 K_{11} ——高压侧电流互感器变比;

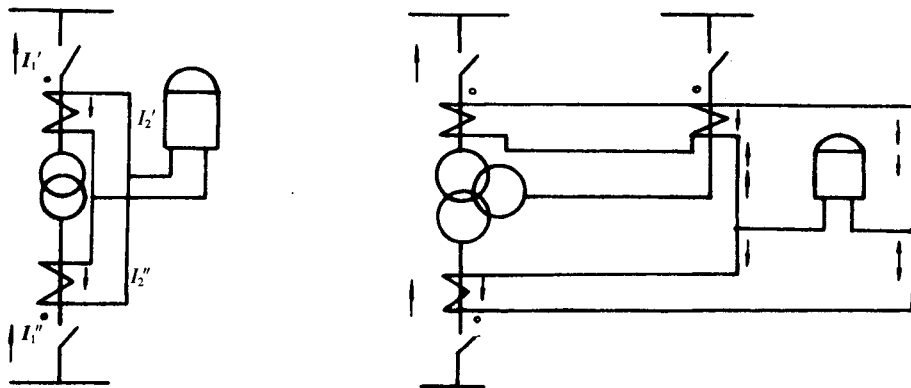


图 C-1 纵差动保护示意图

K_{12} ——低压侧电流互感器变比;

K_B ——变压器高低压变比。

1.1.2 变压器纵差动保护的要求

所谓纵差动保护,即在保护回路中,出现不平衡电流时,继电器才会动作,变压器合闸时,出现励磁涌流,仅在某一侧,反应到差动回路,即为不平衡电流,或者在变压器外部故障切除后电压突然恢复时,亦会出现很大的涌流,随着合闸角度的不同,最大电流可达到额定值的6~8倍,并伴有大量直流分量和高频分量,造成差动保护动作,为防止和躲过正常的励磁电流,在纵差动保护装置中,采用了具有速饱和差动继电器和二次谐波制动以及短路电流和励磁电流波形鉴别装置。

此外,由于变压器两侧电流相位不同产生的不平衡电流和带负荷调整分接头产生的不平衡电流可改变电流互感器的接线和变比来避开这些影响,使差动保护在满足选择性的同时,还有足够的灵敏性。

1.2 变压器的电流和电压保护

变压器的电流和电压保护,是差动保护和瓦斯保护的后备保护。根据变压器容量和系统短路电流水平不同,有以下几种保护方式。

(1)变压器过流保护 当变压器出现外部故障,引起绕组过电流,以及变压器出现内部故障时,应动作,跳开变压器两侧的断路器。

保护装置的启动电流,应躲开变压器可能出现的最大负荷电流来整定,如并列运行的变压器,应考虑突然切除一台时所出现的过负荷,降压变压器,应考虑低压侧电动机自启动的最大电流。

(2)低电压启动的过电流保护 这种保护装置的原理是只有当电压元件和电流元件同时动作后,才能启动时间继电器,经过预定的延时后,启动出口中间继电器动作跳闸。装置中的低电压元件作用是保证在上述一台变压器的突然切除或电动机自启动时不动作,因而电流元件的整定值,就可不计及可能出现的最大负荷电流。

(3)复合电压启动的过流保护 这种保护是低电压启动过电流保护的一种发展,主要是将原来三个低电压继电器改由一个负序电压继电器和一个接于线电压上的低压继电器组成,在发生不对称短路时,出现的负序电压使继电器动作,由于负序电压继电器整定值小,不对称短路时,电压元件的灵敏系数高,是目前广泛应用的保护装置。

1.3 变压器的瓦斯保护

在变压器内部发生故障时,由于故障点电流和电弧的作用,使变压器油及绝缘材料产生热分解气体,并从油箱流向上部的油枕,当故障严重时,还将出现油流的变化,利用这一特点,构成反应气体和油流的保护装置,称之为瓦斯保护。这种保护装置设在变压器油箱顶部与油枕的联管上,是变压器内部故障的主要保护。目前使用的气体继电器有:

(1)挡板式磁力接点式:当气体继电器内气量达到一定值,开口杯下沉上干簧接点闭合接通信号,当油流冲过挡板后,下磁铁使下干簧接点闭合,接通跳闸回路,这种继电器的整定值,对于管径 $\phi 80$ 型发信号时的气体动作值 $250\text{cm}^3\sim 300\text{cm}^3$,动作跳闸的油流速度为 $0.7\text{m/s}\sim 1.5\text{m/s}$ 。

(2)波托继电器:这是近年从国外引进的一种变压器内部保护装置。它利用波托管的原理,在油管中设置有动压管和静压管,当气量达到 $400\text{ml}\sim 500\text{ml}$ 时,浮子下降,接点接通发出信号。变压器出现严重故障时,内部压力急剧增加,连接油管中产生油流,使继电器内的波纹管内压力不等,磁铁变位,作用跳闸接点,这种继电器防震性能好,灵敏度高。

1.4 压力释放阀保护

压力释放阀是一种新型保护装置,国内外在大型变压器上广泛使用它取代了传统的安全气道,

当变压器内部故障时,压力增至某一值时,压力释放阀动作,并发出信号,同时阀体上彩色标志杆突起于护簧顶部中央,表明装置已动。当压力消失后,又重新封闭。压力释放阀的型号规格有 YSF□/φ25、YSF□/φ50、YSF□/φ80、YSF□/φ130。

2 故障录波装置

随着电力系统的发展,要求不断提高电网运行水平,应运而生的故障录波装置在主要发电厂和 220kV 及以上变电所的应用愈来愈广泛。当电力系统故障或振荡时,迅速启动录波装置,即时记录系统中运行参数和瞬变图形,从中分析继电保护装置在事故过程中的动作情况,及时判明故障原因和位置,对提高设备的可用率有着积极的作用。

2.1 故障录波装置简介

故障录波装置主要由两大部分组成,即启动单元和录波器。

2.1.1 启动单元

该部分是录波装置的核心,包括复合继电器(交流部分)和操作回路(直流部分)。

交流回路主要是复合继电器,其原理是三相负序电压过滤器和零序变流器的交流量经全波整流后,输至继电器。如果发生对称性故障或系统振荡,此时无负序和零序,但由于装置中同时设置了低电压过电流继电器,其接点与复合继电器接点相并联,所以也可使录波装置启动。

直流回路的作用是迅速启动录波器进行录波,能区分“故障”和“正常操作”的状况,并具有能反映录波装置本身工况的功能。

由于电力系统采用了故障录波装置,对于迅速处理电力系统的故障和提高故障准确判断率带来极大方便。

2.1.2 录波器

一般在 PGL 型装置中采用的录波器有 SC-25、SC-10 以及 SJ-320 等型。

2.2 故障录波装置接入系统示意图

图 C-2 中故障点采用变电所 1 台 500kV CT 运行中爆炸,装于变电所乙中的故障录波装置正常启动,并录制到故障过程的波形。见图 C-3。

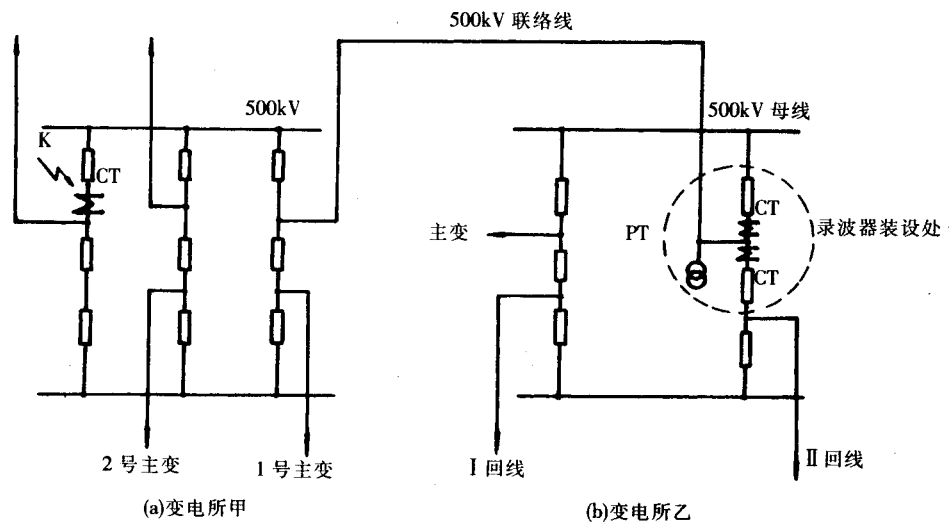


图 C-2 录波器接入系统图

2.3 波形分析

因 500kV CT 爆炸时的波形是非对称性的,因此,零序分量很大,再次重合时,故障未消除,又

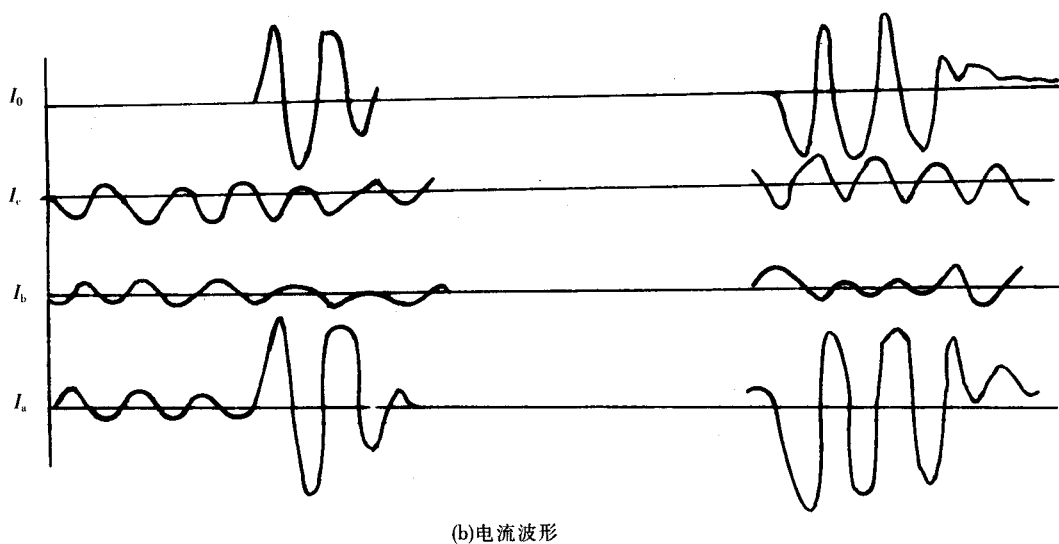
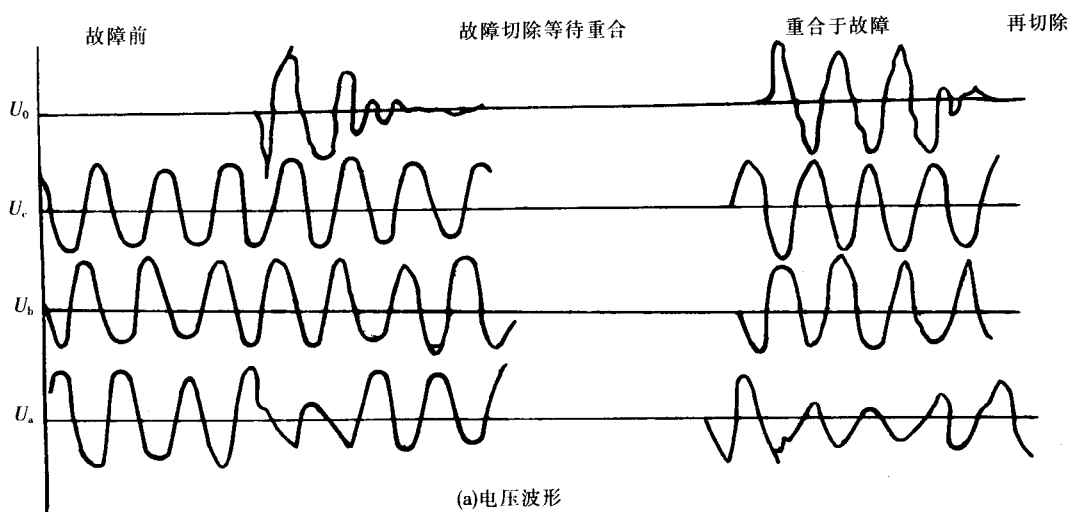


图 C-3 故障波形

再次出现大的零序分量,所录波形很清楚地反映故障前后的状况。

从电流波形上可见 A 相发生了对地短路故障。

附录D 高压试验设备

1 工频试验变压器

1.1 试验变压器的分类

从结构上试验变压器分为铁壳式与绝缘外壳式,后者结构紧凑,占地面积小,但容量小。从原理上试变可分为:单台及串级式、谐振式。

1.1.1 单台及串级式

单台试变是最简单的工频试验设备。它的电压范围为 $5\text{kV}\sim 1\,200\text{kV}$,一般做成单套管,为了克服绝缘上的困难,在电压较高时,铁壳式有的做成双套管。最大的单台双套管试变电压为 $1\text{kV}\sim 1\,600\text{kV}$,是德国TU公司生产的。

电压较高的试变,多采用串级式,以解决绝缘问题,串级式有两台、三台,最多为四台串级。

1.1.2 谐振式

串联谐振回路如图D-1所示,该回路包括电容 C (试品与高压回路附属物电容之和)、电抗器 L (电抗器的 L 可在大范围内调)及高压工频电源 U_H 组成。

改变回路参数(或电源频率 f ,可到 200Hz),可产生串联谐振,在试品上产生一个远高于 U_H 的电压 U_C ,即 $U_C=U_H$,如 $Q=\omega L/R_s$ 为品质因数,可高达50倍,则 $U_C=50U_H$ 。

当试品为电容器、电缆时,其电容量很大,所需的试变及电源容量也很大。用串联谐振装置的优点是:电压易于保证为完全正弦,闪络或击穿后供给的能量很小,调压设备容量小,如发生故障,只会危及电抗器,价格也比正常试变低很多。因此,电缆厂、电容器厂优先采用这种设备。不足之处是不能做空气间隙、绝缘子串试验,污秽试验、淋雨试验也不适用。

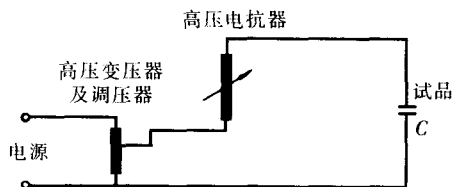
从原理上讲,还有一种并联谐振回路(见图D-2),有可调电源、高压试变、可调高压电抗器以及电容等,这种回路的电流可达 100A 。实际上,试变与电抗器通常装在一起,也有电抗器与变压器自耦连接或稍加改动接成串联谐振回路的。

由于并联谐振回路既要有高压变压器,又要有高压电抗器,优点不多,因而应用较少,只在需要大电流、高电压时才用。

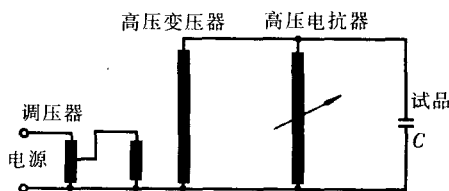
当试品为感性负载时,如做高压电抗器试验,往往采用类似并联谐振回路,但它不在谐振点工作,目的是减少试变及供电系统的容量,高压电容器组(电容塔)是可以调整的, $330\text{kV}\sim 500\text{kV}$ 电抗器试验,各工厂均按此进行,故亦称并联回路。

1.2 串级试验变压器的基本原理分析

一般试变可用图D-3等值回路表示,稳态输出电压 U_C 与输入电压 U_0 之比为:

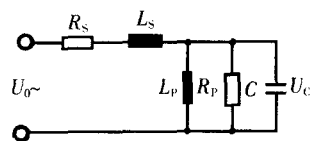


图D-1 串联谐振回路



图D-2 并联谐振回路

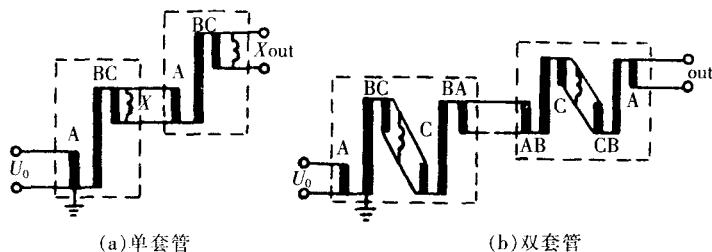
$$\frac{U_c}{U_0} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{L_s}{L_p} - \omega^2 L_s C + \frac{j\omega L_s}{R_p} + j\omega R_s C + \frac{R_s}{j\omega L_p}} \quad (D-1)$$



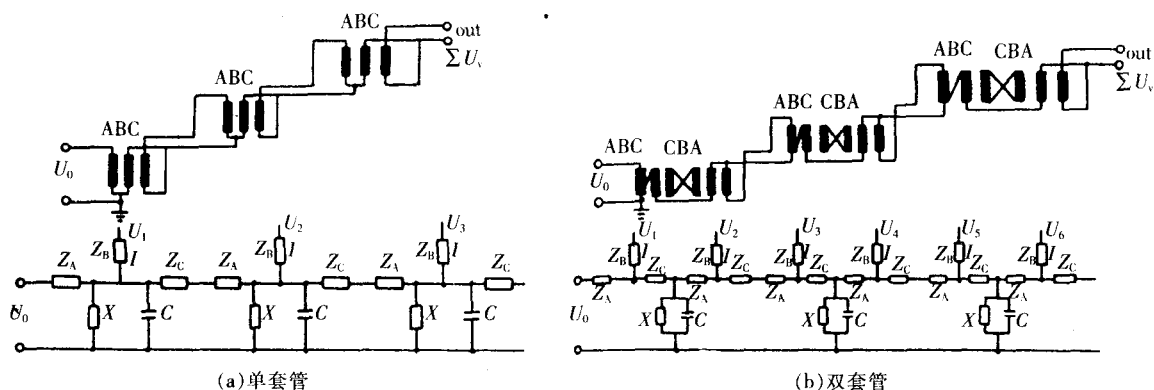
图D-3 等值回路

式中, C 表示负荷电容, R_p 表示泄漏及损失的并联电阻, R_s 和 L_s 分别表示试变、串级试变或谐振回路的(损失)电阻与电感, 仅并联谐振回路有电感 L_p , 其余回路均不存在电感。

图D-4是串级试变的原理接线图, 有单、双套管之分。其中, 一台双套管试变相当于两台单套管试变串级。A 为一次或励磁线圈, B 为高压线圈, C 为传输线圈(对双套管式也叫平衡线圈), 串级试变等值线路见图D-5。



图D-4 串级试变原理接线图

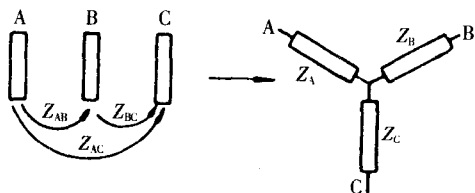


图D-5 串级等效线路图

单台试变短路阻抗很小, 在串级后显著增加。阻抗转换见图D-6, 它们之间有如下关系: 1、2、3级串级输出电压是负荷电流的函数, 关系式如表D-1。

$$Z_{AB} = Z_A + Z_B \quad Z_A = \frac{Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}}{2}$$

$$Z_{BC} = Z_B + Z_C \quad Z_B = \frac{Z_{AB} + Z_{BC} - Z_{AC}}{2}$$



图D-6 线圈阻抗转换

表D-1

串级数	图D-5(a)中 ΣU_i	图D-5(b)中 ΣU_i
1	$U_0 - (X_A + X_B)I$	$2U_0 - (5X_A + 2X_B + X_C)I$
2	$2U_0 - (5X_A + 2X_B + X_C)I$	$4U_0 - (30X_A + 4X_B + 14X_C)I$
3	$3U_0 - (14X_A + 3X_B + 5X_C)I$	$6U_0 - (91X_A + 6X_B + 55X_C)I$

$$Z_{AC}=Z_A+Z_C \quad Z_C=\frac{Z_{AC}+Z_{BC}-Z_{AB}}{2}$$

如果 $X_{AB}=X_{BC}$, $X_{AC}=2.5X_{BC}$, 则电抗和 I_{SH} 与串级台数关系如表D-2所示。

从表D-2中可见,随着串级台数的增加, X_{SH}/X_{AB} 增加,而 I_{SH} 减少。由此可以得出: I_{SH} 与串级台数平方成反比。串级台数相同的双套管式比单套管式阻抗大4倍左右,这是串级级数增加的缘故。

用图D-5进行串级试变稳态电压分布计算,可得双套管两级电压分布(见图D-7), U_A/U_0 和 $\Sigma U_v/nU_0$ 分别为第4个高压线圈和整个高压线圈随负荷的变化值, U_3/U_0 、 U_2/U_0 、 U_1/U_0 曲线介于上述两者之间(未画上)。当负荷为感性时,电流为正值,电压降低,处于Y轴负方向,在第Ⅱ象限,即 $k<1$ (电压比);当负荷为容性时,电流为负值,电压升高,处于Y轴正方向,在第Ⅰ象限, $k>1$ 。

按图D-5接上各级的分布电容负荷,亦可计算各级高压线圈的电压暂态分布。

1.3 试验变压器实例

已生产的500kV以下的试验变压器不计其数,单台500kV试验变压器有单、双套管两种。

以沈阳变压器厂生产的2 250kV串级试变为例,单台铁心双柱平放(小容量)或立放(大容量),其上套有平衡线圈,外侧为高压线圈,两柱串联,中性点接于铁心和油箱上,以固定电位。最外是低压或传输线圈,其一端与高压线圈联结,固定电位。首末两高压线圈出头,由375kV套管引出,油箱用375kV瓷柱支撑,分别为1、3、5层;2 250kV出线在顶部。1962年,沈阳变压器厂为西安高压电器研究所生产的一台户内式YDJ-2 250kV/2 250kVA试变,单台重25t,总重100t。1985年为武汉高压研究所生产的户外式YDJC-2 250kV/9 000kVA,单台重60t,总重343.4t,设计风速25m/s。两台串级 $u_k\%$ 均约40%。

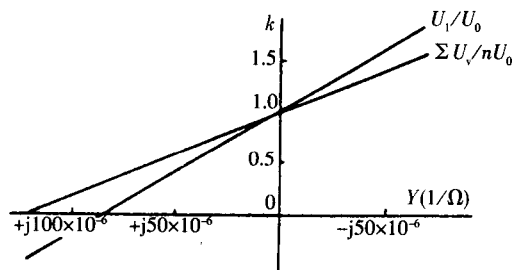
德国VEM TUR厂于1951年生产第一组2 250kV/2 250kVA户内串级试变,装于捷克;1959年生产的2 250kV/2.2A户外式装于前苏联列宁格勒,该设备由三台高压变压器串联,每台变压器从地电位分别供电(即不串激),这样第二台由一台绝缘变压器供电,第三台由两台绝缘变压器供电。以后看来,绝缘变压器及它的电位罩,特别是最上一级,大大增加了有害电容电流,消耗了过多的额定电流。1963年生产的第三组2 250kV/1A串级试变,安装在沈阳变压器研究所,这台试变作了改进,用三台变压器串级,采用电抗器补偿,不再用绝缘变压器了。

从1959~1987年,德国VEM TUR厂共生产了75台750kV试变,其中51台组装了17套2 250V串级试变。沈阳变压器厂从1962~1990年共生产了17台750kV试变,组装了两套2 250kV串级试变。

德国MWB公司生产的聚酯玻璃丝筒试变,最大单台550kV,4台串级,最高输出电压可达2.2MV。该试变绝缘筒(聚酯玻璃丝筒)直径1.5m,高3m,重20t, $u_k\%=2.9\%$,连续功率756kVA,无晕电压400kV,内部双框铁心立放,两柱套两个高压线圈并联,这样可大大地降低阻抗,与铁壳式(双套管)单台相比,阻抗只有1/6,特别是串级,三台串级阻抗可减少到1/24,如取相同阻抗,则铁心可以

表D-2

串级数	图D-5(a)			图D-5(b)		
	X_{SH}/X_{AB}	$I_{SH}(A)$	相对值	X_{SH}/X_{AB}	$I_{SH}(A)$	相对值
1	1	100	1	7	28.6	1
2	7	28.6	1/3.5	54	7.4	1/3.9
3	23	13.0	1/7.67	181	3.3	1/8.6



图D-7 双套管两台串级试变电压分布与Y的关系

大为减小,重量也随之减轻。

上述筒式试变最大的优点是占地少,移动方便,可放在铁轨或气垫上运输,特别适合于高试验室内使用。世界上最著名的法国雷纳第、加拿大魁伯克(IREQ)高压试验室各装有一台2.2MV串级试变设备(4台串级),每个单元均有电抗补偿,补偿度20%。平顶山高压开关厂和沈阳高压开关厂亦各装有一套 $3\times 400\text{kV}$ 筒式试变。

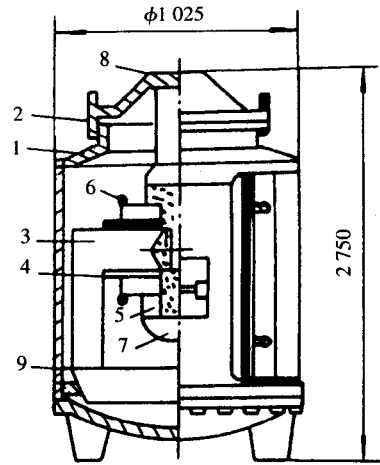
国内营口特种变压器厂试制了 $2\times 500\text{kV}$ 筒式串级试变。

为了解决GIS的工厂试验,MWB公司在GIS互感器的基础上,发展了TES230~1000SF₆绝缘试变系列,该试变用SF₆绝缘,对GIS试验时不使用引出套管,用环氧法兰盘与GIS相连,整个高压装置在金属外壳之中。和普通试变一样,也可用SF₆套管引出高压,作其他电器产品试验。其内部结构见图D-8,外形及布置见图D-9。已做成的最大一台TES1000/375BM装在西安高压开关厂,它包括两台并联的375kVA变压器,一台1000kV/1000pF耦合电容器及一台1000kV气/SF₆引出套管。试变额定值为15min输出375kVA, $u_k\% = 18\%$, 5min输出500kVA, 2min输出1000kVA, 长期工作输出200kVA, u_n 时局放20pC, $0.8u_n$ 时5pC。内充SF₆,工作压力为0.5~0.7MPa(绝对),一次空心铜管内通油冷却,重450kg,气垫运输。为了减少电源系统容量,设有16(级) $\times 100\text{kvar}$ 电抗器补偿。该试变不能做成串级式。

沈阳高压开关厂引进MWB公司TES750/200试变,设计了一个试验罐与它相连。将500kV GIS的盘式绝缘子固定在罐内,充0.4MPa SF₆,试验绝缘子局放与耐压至680kV(罐体屏蔽,最小局放可达2pC),占地及空间均小。

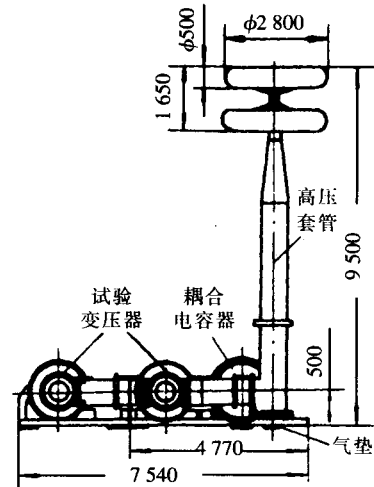
西安交通大学与汉中变压器厂共同研制了 $2\times 150\text{kV}/30\text{kVA}$ SF₆筒式两台串级试变,其内部结构类似双铁心串级电压互感器,层间绝缘采用聚酯薄膜(PET),其工频场强在100kV/mm以上,主绝缘靠SF₆(0.3MPa SF₆与变压器油强度相同),

电极边缘起始放电场强设计低于膜间隙起始放电场强。上海电缆研究所与沈阳变压器厂合作为该所制造的1500kV/6000kVA串联谐振变压器,由三台500kV/2000kVA双套管式变压器组成,单台变压



图D-8 TES-1000试验变压器内部结构

- 1—钢外壳 2—盆式绝缘子 3—铁心 4—一次绕组
5—高压绕组 6—均压电极 7—高压电极触头 8—高压测量电极

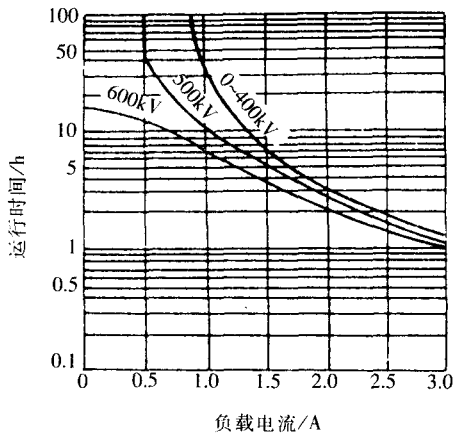


图D-9 TES-1000SF₆试变外型及主回路方块图

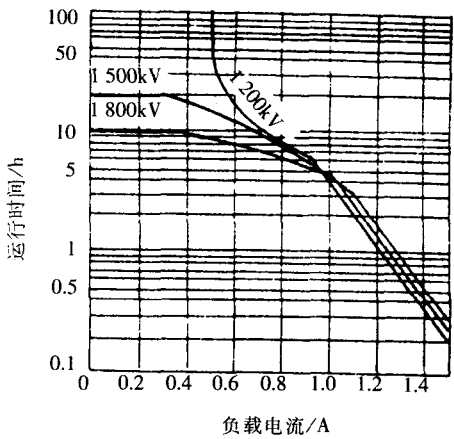
- Q—电源板 RE—补偿电抗器 RT—调压器 TES—试验变压器 NF—电源滤波器 C—耦合电容器 NSP—高速低压保护 O—被试品

器没有励磁与传输线圈,双框铁心立放,外套平衡线圈、高压线圈,三台高压线圈串联,外形类似一台正常的1 500kV串级试变,电位架、电晕罩均齐全,在三台变压器平衡线圈端各并联一台2 000kVA移圈式调压器,通过地面绝缘杆调整电抗,可使二次获得某一电抗值,与高压变压器组成所需的电感,这样三台串成一个总电感,实测值为10~500mH(低压6kV),由于高压为625~31 250H,可试电容16 000~32 000pF。在50Hz下谐振,电源容量只需高压变压器75kV 300kVA(只占额定容量的5%)。为了扩大使用范围,还装了一套耦合电容器(1 500kV 3 000pF)。

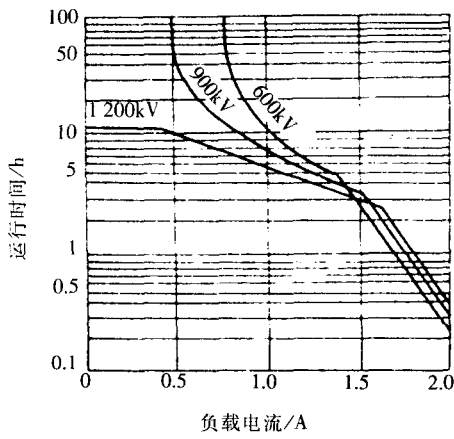
对试变有各种各样的要求,除结构要素(胶木筒式,铁壳式、双套管, SF₆, 谐振式)外, $u_k\%$ 、短路电流 I_{SH} 与运行时间也很重要,对运行时间一般300kV及以下为0.5h, 500kV及以上为5min,但也有时间较长的为1~3h,图D-10给出了VEM TUR厂3×600kV试变的运行曲线,供参考。



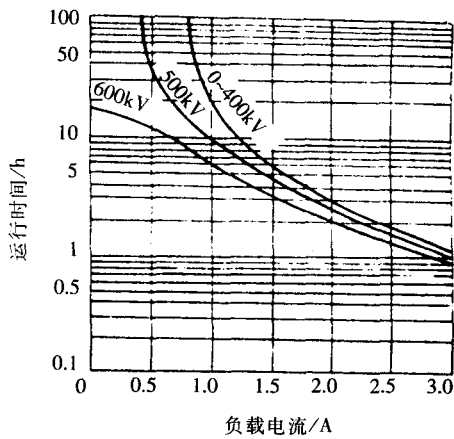
(a) 单相600kV调压变压器供给840kVA



(b) 两台串级1 200kV调压变压器供给1 260kVA



(c) 三台串级1 800kV调压变压器供给1 260kVA



(d) 三相1 040kV调压变压器供给2 000kVA

图D-10 VEM TUR串级试变运行曲线

1.4 串级试验变压器的补偿与保护

为了增大串级试变的容量,VEM TUR厂在为沈阳变压器研究所生产的2 250kV串级试变(该设备由三台750kV/1 500kVA试变组成)的 I、II、III级平衡线圈各接入105和420kvar的油浸电抗器,用它可获1A串级电流,减少 $u_k\%$ 。

为了改善波形,制造厂在该设备使用了滤波器,在 I、II、III级平衡线圈两端接入113mH、10μF

(两只并联)、81mH、5 μ F(一只)和81mH、25 μ F(两只串联)三组电抗器和电容器。电抗器带有抽头,分别调节到3、5、7次谐振滤波。L、C除通过谐波电流外,还通过工频电流,由于不希望工频电流太大,为此,尽可能选大的L,以便与C配合。该滤波器在电压较低而铁心未饱和时,作用不大,在电压较高时,可以保证波形符合标准要求。

有的试变需要做局放试验,所以在电源侧应装有L型、II型、L-C型滤波器。

跳闪是一种特殊闪络,会对正常串级试变带来影响,而对串联谐振回路无影响。跳闪发生于正半波峰值处,空气间隙如果在随后的负半波能耐住较正半波高的电压(一般要高10%),则在SF₆间隙跳闪后过电压更高,这样会对试品和试变造成危害。尽管在实践中跳闪很少发生,但仍需要加保护装置。

当闪络或击穿发生时,电压由峰值突降至零,由此产生很陡的工频截断波,由于其截断陡度在试变的纵绝缘上产生很高的电气应力,会危及绝缘,所以为了减少陡度,也需要采取保护措施。

为此需要在高压端串联保护电阻,其值应使时间常数大于微秒级,使截断陡度变缓,要处于操作波范围内。电阻有金属结构与水电阻结构两种,当外绝缘闪络时,全部试验电压在瞬间加到电阻上,这时电阻外绝缘要能承受工频过电压,电阻值应作如下考虑:

$$\tau = RC$$

C为变压器入口电容,对750kV及以上试变, $C \approx 1\,000\text{pF}$, 如果 $R = 20\text{k}\Omega$, 则 $\tau = 20\mu\text{s}$ 。由于 τ 值较小,所以取 $R \geq 20\text{k}\Omega$ 。

为了改善暂态电压分布, YDJC-2 250/9 000最上一级两个高压线圈各并联一个2 500pF高压电容器。

试验油间隙击穿时,可以产生1.6~1.8倍的电压;在SF₆内击穿,可产生1.9倍(理论上可达2倍)的电压,所以通常在高压端加球隙保护。球的放电电压比较稳定,可用1.2倍电压击穿球距保护。

使用球隙及电阻的保护可以降低平衡线圈上的过电压,早期的双套管试变均借此保护,后来的保护是在平衡线圈上加避雷器。

在高压试验室使用球隙和电阻比较麻烦,它用绝缘子吊挂,因此占地大,它使吊车的使用受限制。近年来,最新设计的试变,能够承受截断陡度及跳闪,因此就不需电阻及球隙保护。

还有一种低压保护,见图D-11。这种保护在跳闪发展到闪络的瞬间,使供电电源短路,这样就避免了过电压。图中 Z_i 为限制短路电流的阻抗。图D-11在晶闸管动作前,影响供电电压,为此 Z 用纯电感,用以减少损耗。

在试变上一般按其额定电流设置过电流保护,在有的试变上还安装温度指示、报警及自动切除装置。

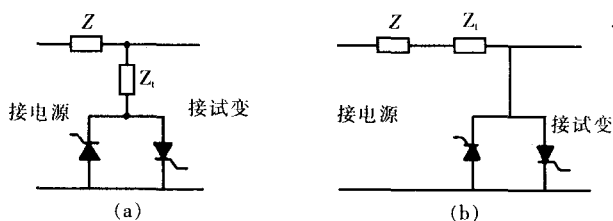
2 冲击电压发生器

2.1 冲击电压发生器(IVG)的基本线路

2.1.1 单极充电回路

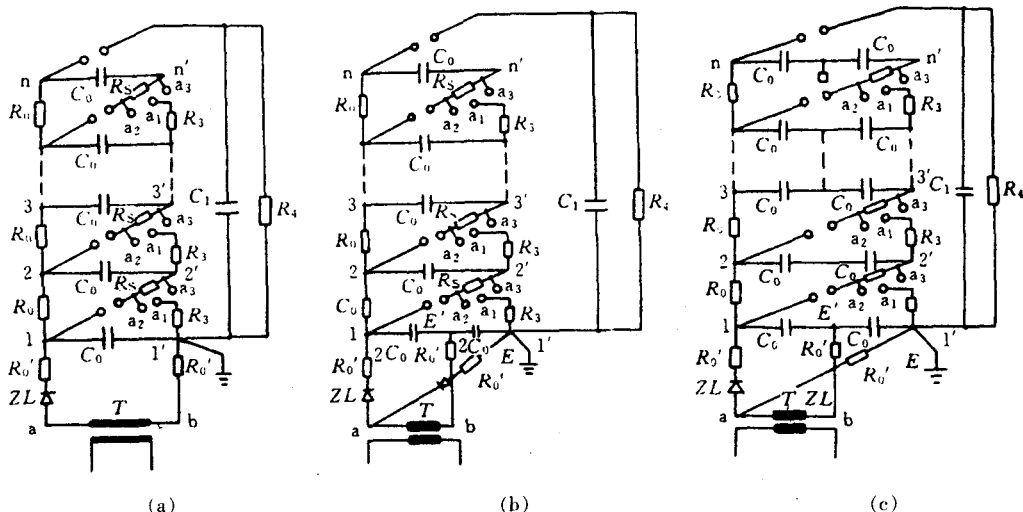
图D-12(a)为最早的充电回路,它充电效率低,只用于某些小的IVG上,其高压变压器末端接地。

2.1.2 倍压充电回路



图D-11 低压保护

MWB的NSP采用a线路, $Z = 0.88\text{mH}$, $Z_i = 0.44\text{mH}$, 电压切断时间 $< 5\text{ms}$ 。b线路,原则上与a同,但 $(Z_i + Z)$ 影响线路供电电压,不如a线路。



图D-12 发生器基本线路

C_0 —主电容器 C_1 —试品及负荷电容 R_0, R_0' —充电电阻 R_1, R_2 —波前电阻 R_3, R_4 —放电电阻(R_3 亦称电位电阻)

附) T—高压变压器 ZL—高压硅堆 a_1, a_2 —相连高效率回路 a_1, a_3 —相连低效率回路

有图D-12(b)、(c)两种,图D-12(b)只第一级电容器中间有个抽头,它的所有电容器均相同,采用胶木筒式电容器比较方便,高压变压器a端需全绝缘,b端只需半绝缘;图D-12(c)在大多数IVG上采用,它充电效率高,一级用两只电容器(个别也有用4及6只的),容易制作,特别是用铁壳式电容器,这种电路在当今多数IVG上采用。发生器启动过程如下:充电完成后,1,2,...,n各点具有 u_0 电位,1',2',...,n'具有0电位,当第一级球隙点火后,2'获得 u_0 电位,而2有 $2u_0$ 电位,3'还来不及变化,仍处于0电位。这样,第二级球隙就有 $2u_0$ 电位差,很快击穿,以后依次同样发生,直至第n级球隙击穿,产生冲击高压加到试品上。由于有杂散电容存在,第二级后各球隙电位差不会成倍增长,一般会增高10%,所以启动应无问题。

IVG的主要参数是标称电压、冲击电容量及能量。标称电压 $U_0=nu_0$ (n为级数, u_0 为每级充电电压), u_0 愈高(多数为200kV~300kV级),级数愈多,发生器电压愈高;冲击电容量或称发生器串联电容(主电容) $C=C_0/n$ (图D-12(a)、(b))或 $C=C_0/2n$ (图D-12(c)),C一般为15nF~30nF,C愈大,可试的试品电容量愈大(一般电容试品 $C/C_1 \geq 5$,电感试品 $C \geq 2T_b/L$,但很难达到),故低值为电器工厂所用,高值为变压器厂所用。通常用最大储能W代替C作发生器性能标志, $W=\frac{1}{2}CU_0$ (kJ),这是一个需要计算而无法直接测量的量,它标明发生器容量大小。

2.2 冲击电压发生器的结构

IVG结构一般包括三个部分:充电装置、本体、附属设备。

2.2.1 充电装置

由高压变压器、整流器及充电电阻组成。

2.2.2 本体

对于脉冲电容器(多数充矿物油或用其他高介质合成油,也有用蓖麻油的)多数是铁壳式,少数是胶木筒柱式(直立或斜放),极少数是瓷外壳式(立放)式;电阻 $R_1 \sim R_3$ 多是双层正反绕低电感金属

电阻;本体是将电容器、电阻和球间隙等组成一个整体的绝缘结构。最古老的支撑结构外形为阶梯式,整个结构为一三角形梯子,电容置于其上,用木头或其他绝缘材料支撑;近代大多数为塔式,用胶木筒支撑,或用瓷套支撑的柱式结构。球为空心圆球,装在传动杆或装置上,多级一起联动,为了使放电不受大气影响,20世纪80年代将球隙从上到下整体密封在装有视察窗的胶木筒内。为了使点火同步且更加可靠,英国人发明多极点火间隙。

2.2.3 附属设备

控制桌内设有调压器及控制、测量、指示设备。过去多为手工操作,近来多用微机自控。

最简单的截断间隙是0.25m~1.5m直径的球极的间隙,安装了点火电极,这样可以进行正常电压的测量与截断。由于截断的分散性以及难以满足变压器冲击试验的 $2\mu\text{s}\sim 5\mu\text{s}$ 截断的要求,故20世纪80年代出现了多级截断间隙,最大的已达3.6MV。

测量主要用分压器,常用的有电阻式与阻尼电容式。电阻式为屏蔽式,可做到2MV左右($R\leq 20\text{k}\Omega$),由于响应特性好,为多数试验室所用,可试500kV级产品;阻尼电容式由于不受电阻值的限制,可以做到高于2MV,故可与大型IVG配套(已做到6MV及以上),其快速现象由电阻传递,随后持续电荷由电容传递,这样可以得到好的响应特性,这种分压器的电容值要小于1 000pF,否则负荷太大,响应特性变坏,也影响发生器的效率。

波形是将分压器降低的电压用阴极射线示波器(近来还有数字显示仪)显示出来,从而方便了拍照并定出波形参数。

IVG的启动是靠控制桌上的点火装置发出10kV~20kV单次脉冲,使第一级球隙(或多级间隙)点火,并启动示波器扫描,完成整个加压及测量记录。

2.3 冲击电压发生器的同步系统

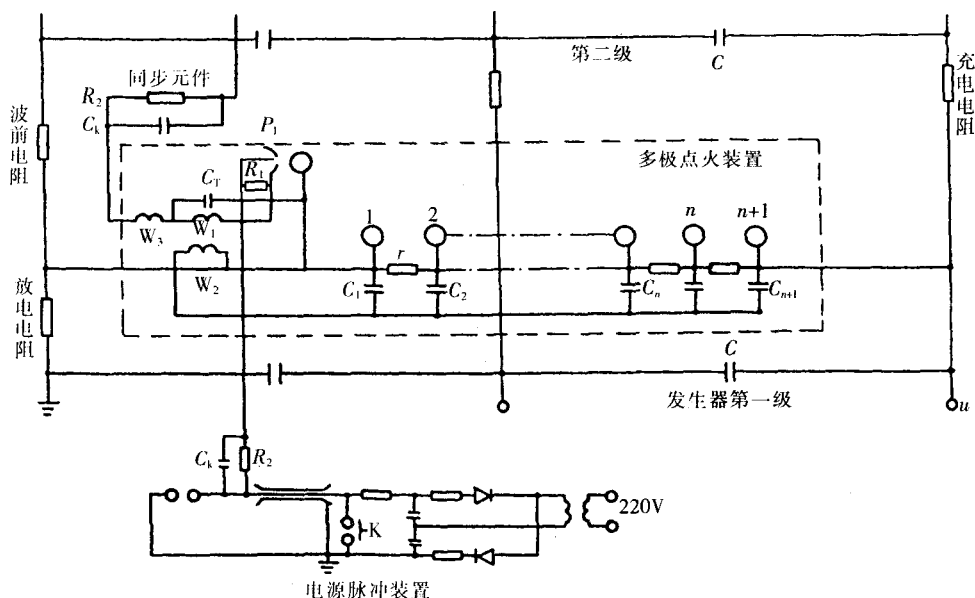
多级冲击发生器的同步稳定性是极为重要的问题,它会影响发生器的正常运行。

多级发生器的同步,通常用球间隙,在外施同步讯号或自同步情况下启动。由发生器的工作原理可知,各级球的同步过电压受寄生电容分布影响。对于大型发生器,由于其结构增大,级间电容增大,使过电压降低。空气环境污染及湿度对稳定性也有很大的影响。在某些运行情况下,例如操作波试验时充电时间较长,波前电阻较大,雷电短波时放电电阻较小等,都会对同步带来不利影响,造成发生器运行困难,因此世界各国都在研究各种改善同步性能的方法。

在常用的球极同步系统上,有两种方式,即转动式和移动式。前者动球固定在一根转轴上,电动机带动转轴转动,达到调节球距的目的。此法的主要缺点是启动性能不好,因第一级球的点火间隙在球的中心,在转轴的某一位置,此间隙可对正另一球心,易于启动,但若转动另一位置,则不能对正中心,从而不能保证启动稳定。移动式装置的动球极不直接固定在转轴上,而是通过一个变向器,将转轴的转动变为球极的移动,这将使点火电极对准球心,有利于同步。

其他方法有采用充压缩气体的密封球隙、通以干燥清洁空气的封闭球间隙,在每级球极均用三电极球间隙、多极点火间隙等。下面着重分析多极点火间隙同步系统。

图D-13为同步系统线路,虚线部分为多极点火间隙,其由两部分组成,即间隙主体及脉冲电源。当发生器充电电压为 u ,均压电阻 r 使直流电压均匀分布于 n 个串联小间隙上,每个间隙电压为 $\frac{u}{n}$ 。电源脉冲装置经同步元件电阻 R_2 和引燃电阻 R_1 给电容器 C_T 充电,发生器其他各级(2~ n 级)充电电流还通过前级的原绕组 W_1 和第三绕组 W_3 。发生器同步运行时,启动按钮K,电源短路,反极性脉冲输入脉冲变压器,使间隙 P_1 引燃工作, C_T 通过脉冲变压器的原绕组 W_1 放电,在高压绕组 W_2 中产生高压脉冲 E 加到主体间隙小球1。当 E 输入后,通过小电容 $C_2\sim C_n$ 传到多极点火电极2~ n ,由于电极1通过



图D-13 多极点火间隙同步系统线路图

放电电阻接地,而电极 $n+1$ 接于电容器端,其电位不能改变,这样若 E 和 u 同极性,将使第一和第 n 个小间隙电压分别为 $E + \frac{u}{n}$ 和 $E - \frac{u}{n}$,其他间隙电压仍为 $\frac{u}{n}$ 。当此电压大于小间隙放电电压 e 时,则此两小间隙放电,这样第2和第 $n-1$ 间隙的电压变为 $E + 2\frac{u}{n}$ 和 $E - \frac{u}{n}$,又使这两个间隙放电,因之左边第 m_1 个间隙的电压为 $E + m_1\frac{u}{n}$,右边第 m_2 个间隙为 $E - (n - m_2 + 1)\frac{u}{n}$ 。当 E 足够大,间隙则按顺序击穿,直至最后一个间隙,此间隙左边电极电位为零,而右边电极 u ,即最后一个间隙电压为 u ,若 $u > e$,最后一个间隙亦放电而形成整个间隙放电。在上述放电过程分析中,没有计及级间电容,实际上此电容较大,会降低间隙过电压。按上述放电过程,在 $u > e$ 时,间隙才能全部动作,若发生器不工作,即 $u = 0$,用脉冲电源启动,无论脉冲幅值多高,理论上均有一个间隙不能动作。事实上,由于小回路中有寄生电感,是一振荡放电过程,在脉冲幅值够大时,全部小间隙均能放电。

在前级高压绕组 W_2 产生 E 去启动多间隙的同时,第三绕组 W_3 亦产生高压通过同步电容 C_k 去启动后级,这样使发生器的整个同步系统同步启动。

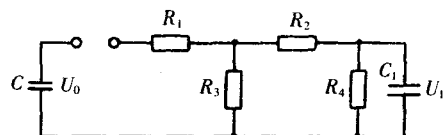
间隙主体电容链 $C_1 \sim C_{n+1}$ 分别耐受不同的电压,而 C_{n+1} 最大为发生器额定级电压。脉冲变压器要求产生上升时间很陡和幅值很高的脉冲电压。这两个问题是多间隙制造的关键。

多极点火间隙同步系统的主要优点是没有传动调节机构,在10%~100%很宽的充电电压范围内可靠地动作,且与冲击发生器的结构、放电回路和输出波形无关。由于此系统无传动部分,易于做成封闭式,且可通以干燥的空气,避免灰尘和湿度的影响。

2.4 冲击电压发生器的参数计算

图D-12的IVG基本线路可归纳为图D-14的简化电路,计算基于:

(1)忽略了电感。因为它的存在增加了输出电压,减



图D-14 发生器的简化电路

少了波前时间,计算偏于保守;

(2)所有负荷电容均集中于 C_1 ;

(3)忽略了分压器的阻尼电阻;

(4)需计及IVG顶部电容

$$C=2\pi\epsilon_0 \times 1.3(a+b+c)/3 \quad (\text{pF}) \quad (\text{D-2})$$

式中 a, b, c ——顶罩电极尺寸;

1.3——对地、墙及天花板增加电容的系数。

(5)需计及负荷电容、试品及分压器电容;

(6)需计及导线电容

$$C=2\pi\epsilon_0 l / \ln(4h/d) \quad (\text{D-3})$$

式中 l ——导线长, m;

d ——线径, m;

h ——离地高, m;

ϵ_0 ——真空介电系数, $2\pi \times 8.85 \times 10^{-12}$ 。

此处也可考虑墙及天花板邻近效应而引起的增加系数,如乘1.3。

从图D-14可以看出,如 C 充电到 U_0 ,当对 C_1 放电时,电荷均布,有一电容效率系数

$$\eta_c = \frac{C}{C+C_1}$$

如设 $R_2=0, R_4=\infty$,则

$$\eta_{R_1} = \frac{R_3}{R_1+R_3}$$

如 $R_1=0, R_4=\infty, R_2 \neq 0$,则流过 R_2 上的电流与 C_1 上的电流相同,于是 $\eta_{R_1} < \eta_{R_2}$,前者称为低效率回路,后者称为高效率回路。在实际使用的IVG中,只有 $R_4=\infty$ (不存在),且 $R_2=0$ (即不用外加波前电阻),而放电电阻 R_3 用分压电阻取代时,才有低效率回路,绝大多数发生器均用高效率回路。

图D-14中产生的电压波形为双指数函数之差,可表示为:

$$\frac{U_1}{U_0} = \eta_c \left(\exp \frac{-t}{\tau_b} - \exp \frac{-t}{\tau_f} \right) \quad (\text{D-4})$$

$$\frac{U_1}{U_{\max}} = \eta = \eta_c = \eta_s \quad (\text{D-5})$$

式中 τ_f ——波前时间常数;

τ_b ——波长时间常数;

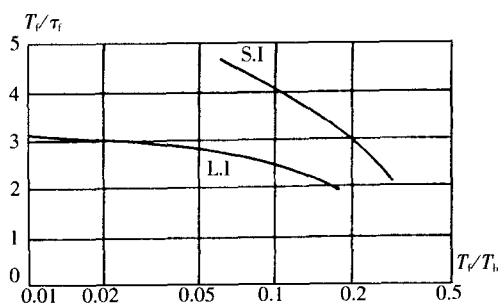
η ——电压效率系数;

η_c ——电路效率系数;

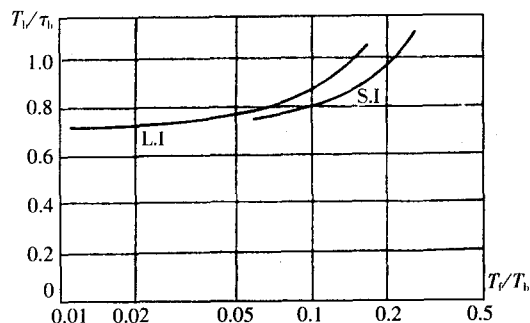
η_s ——形状效率系数。

实际上冲击时间常数是不知道的,只知道波前时间和半峰值时间。参数和时间的关系可从图D-15获得,对标准雷电冲击和操作冲击可分别得到 $\tau_f=0.407\mu\text{s}$, $\tau_b=68.5\mu\text{s}$ 与 $\tau_f=61.7\mu\text{s}$, $\tau_b=3144\mu\text{s}$ 。

图D-16示出了形状效率系数与 $\frac{\tau_f}{\tau_b}$ 的关系,标准雷电冲击与操作冲击分别为 $\eta_s=0.964$ 与 0.906



(a)



(b)

图D-15 $\frac{T_f}{T_i}$ 和 $\frac{T_b}{T_i}$ 与 $\frac{T_f}{T_b}$ 的关系曲线

(均为定值)。

同样,形状效率系数可以通过解析式求得:

$$\eta_s = \frac{2K}{1+K} \left(\frac{1-K}{1+K} \right)^{(1-K)/2K} \quad (D-6)$$

式中 $K = \frac{1 - \frac{\tau_f}{\tau_b}}{1 + \frac{\tau_f}{\tau_b}}$

在 C 和 C_1 已知时,还要求电阻参数与 η_c ,其关系如式(D-7)~式(D-9):

$$R_1 + R_2 = \frac{\tau_f}{C_1} \frac{(1 + \frac{C_1}{C})(1 + \Delta_2)}{(1 + \Delta_3)(1 + \frac{\tau_f}{\tau_b})} \quad (D-7)$$

$$\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{\tau_b}{C + C_1} \frac{(1 + \frac{\tau_f}{\tau_b})(1 + \Delta_1)}{1 + \Delta_2} \quad (D-8)$$

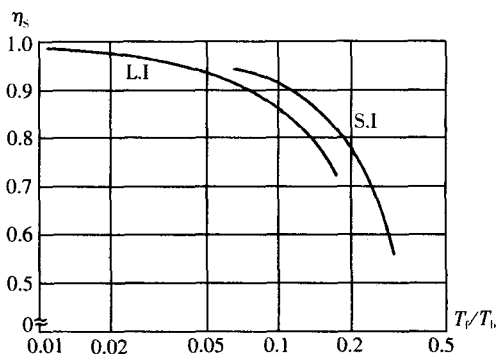
$$\eta_c = \frac{1}{(1 + \frac{C_1}{C})(1 + \Delta_2)K} \quad (D-9)$$

式中 $\Delta_1 = \frac{R_2}{R_3 + R_4}$

$$\Delta_2 = \frac{1}{1 + \frac{C_1}{C}} \left(\frac{R_1}{R_3} + \frac{R_1}{R_4} + \frac{R_2}{R_4} + \frac{R_1 R_2}{R_3 R_4} + \frac{C_1 R_2}{C R_3} \right)$$

$$\Delta_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_3}$$

在设计一台发生器时,可研究两个极端情况,一是波前电阻接在放电电阻前,另一是接在后,于是方程可变化为:



图D-16 形状效率系数与 $\frac{T_f}{T_b}$ 的关系曲线

$$R_2=0, R_4=\infty$$

.....

$$R_1 = \frac{\tau_f}{C_1} \frac{(1 + \frac{C_1}{C} + \frac{R_1}{R_3})}{1 + \frac{\tau_f}{\tau_b}} \quad (D-10)$$

$$R_3 = \frac{\tau_b}{C} \frac{1 + \frac{\tau_f}{\tau_b}}{1 + \frac{C_1}{C} + \frac{R_1}{R_3}} \quad (D-11)$$

$$\eta_c = \frac{1}{(1 + \frac{C_1}{C} + \frac{R_1}{R_3})K} \quad (D-12)$$

$$R_1=0, R_4=\infty$$

.....

$$R_2 = \frac{\tau_f}{C_1} \frac{(1 + \frac{C_1}{C} + \frac{C_1 R_2}{C R_3})}{1 + \frac{\tau_f}{\tau_b}} \quad (D-13)$$

$$R_3 = \frac{\tau_b}{C} \frac{1 + \frac{\tau_f}{\tau_b}}{1 + \frac{C_1}{C} + \frac{C_1 R_2}{C R_3}} \quad (D-14)$$

$$\eta_c = \frac{1}{(1 + \frac{C_1}{C} + \frac{C_1 R_2}{C R_3})K} \quad (D-15)$$

从式(D-12)可以看出, R_1 愈小, η_c 愈高。

为防止级间振荡, IVG的内部每级 $R_1=5\sim 15\Omega$, 这对输出电压有相当大的影响, 对电容器也无益。大的发生器内部电阻可避免顶部过电压, 而小的发生器外部电阻 R_3 需作调节。

当发生器需作雷电和操作两种冲击时, 通常只需采用两种不同阻值的波前电阻与放电电阻, 这就扩大了发生器的使用范围。

3 冲击电压测量设备及校正

3.1 分压器类型

为了将高冲击电压转换为低冲击电压, 必须使用分压器, 它可将数百万伏电压降低到仪表、示波器可测量的电压, 即数百伏, 至多不超过2kV。

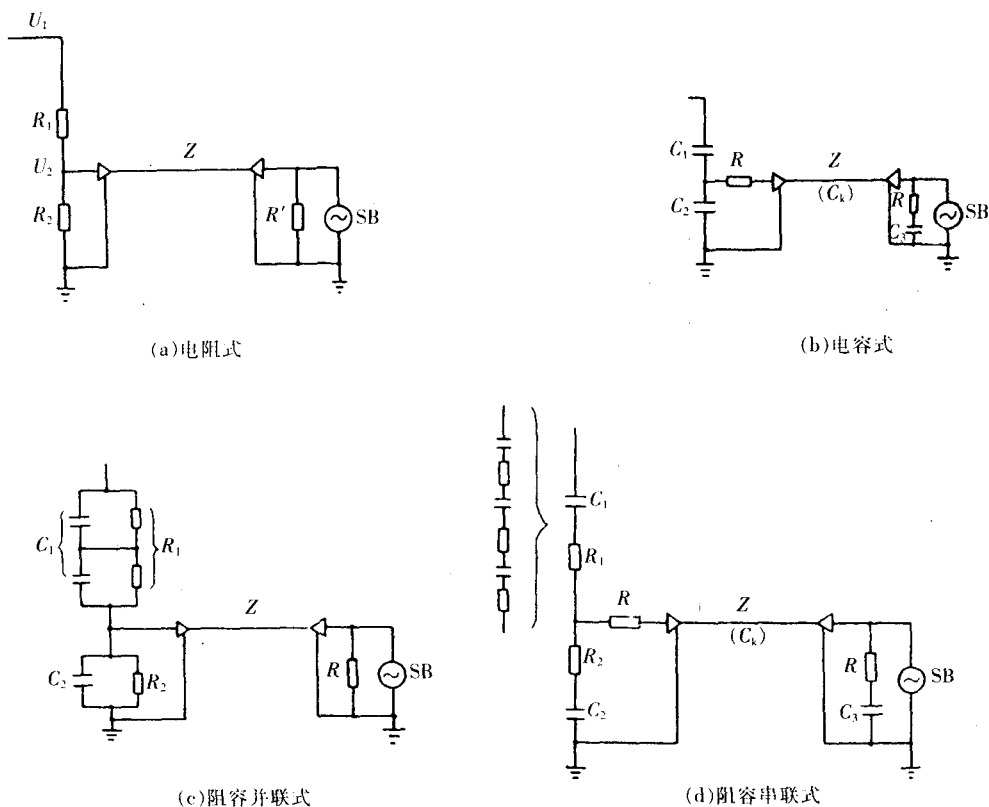
按原理分压器可分为四类: 电阻式、电容式、阻容并联式和阻容串联式。原理线路见图D-17。

3.1.1 电阻分压器

内部电阻为纯电阻, 结构简单, 使用方便, 被广泛采用。由于它有响应时间的要求:

$$T = RC_c / 6 \quad (D-16)$$

式中 R ——分压器电阻, k Ω ;



图D-17 分压器线路

C_e ——对地电容, pF。

所以 R 不能太大,一般 $R \leq 20\text{k}\Omega$,这样电压不能做得太高,多在2 000kV左右,可以试验500kV级产品,一般高压试验室均有1 000kV~2 000kV电阻分压器。

对地寄生电容除通过试验确定外,通常可以用圆柱体计算,这个电容与分压器高度有关:

$$C_e = (10 \sim 15)H \quad (\text{D-17})$$

式中 H ——分压高度, m。

经过计算可以找到频带宽:

$$f_b = \frac{1.46}{RC_e} \quad (\text{D-18})$$

电阻 R 的值与加到直流分压器的电压 U 有关:

$$I \approx (0.5 \sim 1), \text{mA}$$

$$R = (1 \sim 2) \times 10^3 U, \text{M}\Omega$$

式中, U 单位为MV。

对于低频分压器,频带宽为:

$$f_b = \frac{50 \sim 150}{HU} \quad (\text{D-19})$$

式中, f_b 单位为Hz, H 为m, U 为MV。

如 $U=1\text{MV}$,直流分压器 $H=3\text{m}$,则:

$$f_B < 50\text{Hz}$$

对于冲击分压器, $f_B = 10\text{MHz}$, 则

$$RH \approx 10 \sim 15$$

式中, R 单位为 $\text{k}\Omega$, H 单位为 m 。

电阻分压器应尽量减少电感, 为此, 用镍铬或康铜丝正反密绕在一绝缘管上, 层间只垫很薄的绝缘纸, 然后浸在装有变压器油的绝缘筒中, 以缩小分压器尺寸, 减少对地电容 C_e , 并在其顶端装屏蔽环作补偿。且从理论上可以设计使屏蔽补偿电容 C_e (等值) 约等于对地寄生电容 C_e , 这样对地电容 C_e 得到完全补偿 $T=0$ 。实际上不可能完全补偿, 总会存在一定的寄生电容, 以致响应时间也不能做得很小, 这就是电阻分压器只能做到 2MV 左右的原因。

该分压器原理线路见图 D-17(a), 其起始分压比 K_0 等于稳态分压比 $K_\infty = \frac{R_1 + R_2 // R'}{R_2 // R'}$ 。

3.1.2 电容分压器

由多台电容器串联而成, 选取电容比寄生电容相对地大, 使寄生电容影响很小。这种电容器有瓷外壳 (多用于户外) 与胶木筒外壳两种, 电容器设计有两种选择, 一是用同一种电容值, 由于有寄生电容存在, 这样冲击电压分布不均; 另一是按寄生电容值设计为不等电容, 单只电容器电容由上到下逐级减小, 使得分布均匀。无论哪种设计, 电容量不宜过大, 否则会加大冲击发生器的负荷。由于电容器的串联不受限制, 响应特性受到串联数的影响也很小, 所以电压超过 3MV 的多为电容式, 最大达 6MV 以上, 且可为移动式。

还有一种电容式分压器, 即高压为压缩气体标准电容器, 这种标准电容器可做到直流 1.2MV , 冲击 $1.5\text{MV} \sim 1.8\text{MV}$, 使用也比较方便, 负荷电容仅几十皮法 (pF)。这种分压器由于低压电极被全屏蔽, 线性及高频特性好, 且不受外部影响, 所以测量精度高。

该分压器原理线路见图 D-17(b), 其起始分压比 $K_0 = \frac{2(C_1 + C_2)}{C_1}$, 稳态分压比 $K_\infty = \frac{C_1 + C_2 + C_k + C_3}{C_1}$, 当 $C_3 = C_2$, $C_2 \gg C_1$, C_k 较小时, $K_0 = K_\infty$ 。

3.1.3 阻容并联分压器

从理论上讲, 当电压变化较快时, 分压比主要由电容决定, 而变化慢时由电阻决定, 它的电阻线正反密绕在瓷管上, 与每节电容器并联。实践证明, 选取的电阻值不能太小, 否则影响发生器的输出负荷, 所以一般选得比较大。但太大了作用又显得很小时, 这样与无电阻的纯电容分压器差不多, 为此, 实际试验中已将电阻取消, 国外近来也很少用。

该分压器原理线路见图 D-17(c), 其起始分压比 $K_0 = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$, 稳态分压比 $K_\infty = \frac{R_1 + R_2 // R}{R_2 // R}$ 。当设计 $C_1 R_1 = C_2 R_2 // R$ 时, $K_0 = K_\infty$ 。

3.1.4 串联阻容分压器

这种分压器也称阻尼电容分压器, 近来高压分压器多做成这种型式, 它克服了电容回路的剩余电感, 阻止了分压器的振荡, 性能优良。设计上将电阻置于电容器内, 每只电阻仅数十欧, 总电阻也不过千欧。这是现代用得最广泛的高压分压器 ($>3\text{MV}$), 它同样可作为工频电压测量, 额定电压要降到 $1/3$ 冲击电压左右。 6MV 户外式阻尼电容分压器, 其顶部双环为高压电极, 起均压作用。

该分压器原理线路见图 D-17(d), 其起始分压比 $K_0 = \frac{2(R_1 + R_2')}{R_2'}$, $R_2' = \frac{2R_2 \cdot R}{R_2 + 2R}$, 稳态分压比 $K_\infty = \frac{C_1 + C_2 + C_k + C_3}{C_1}$, 当设计 $C_1 + C_2 = C_3 + C_k$, $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 时 $K_0 = K_\infty$ 。

3.2 分压器的校正

3.2.1 分压比的校正

测定分压比的方法有:

(1) 分别测高、低压臂阻抗, 通过计算确定;

(2) 同时测量分压器输入与输出端电压, 通过计算确定;

(3) 利用一个精确可调分压比的分压器与被测分压器构成桥路, 使标准与被测分压器输出平衡, 此法比前二法更精确。

分压比往往是在较低电压下测得的, 对电阻式可在交、直流下进行, 对电容式只能在交流下进行。

3.2.2 分压器的响应

3.2.2.1 方波响应 $G(t)$

向测量系统输入一个方波信号, 其输出信号与时间的函数关系叫方波响应。一台理想的分压器, 当高压加上无前沿方波时, 低压侧得到同一无前沿方波波形。其响应时间等于零, 分压器只起降低电压的作用, 不改变波形。

实际上, 由于有 R 、 L 、 C 的存在, 测量系统不可能无误差地传递, 要测定分压器的响应误差, 就得用方波响应法。

当测量系统输入端加一方波电压时, 在系统输出端即得一输出电压示波图, 为便于比较, 在输入端加单位方波 (即在 $t=0$ 的某一时刻突跃至单位值, 然后一直保持不变, 这时输出电压波形即为单位方波响应), 它反映测量系统对外施加方波电压的接受 (畸变) 程度, 直观地表示了该系统的性能, 通过计算, 可以求出该系统在测量某一试验电压波形的幅值误差和时间误差。

单位方波响应积分的数学表达式为:

$$T = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt \quad (D-20)$$

式中 $g(t)$ 为规一化后系统的单位方波响应。理论上单位方波响应时间等于系统单位方波响应与单位幅值之间的各面积 T_α 、 T_β 、 T_γ ... 的代数和, T_α 、 T_γ 与 T_β ... 分别为单位幅值与下方及上方包围的面积 (见图 D-18)。

$$T = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma \dots \quad (D-21)$$

试验按图 D-19 进行, 按方波电压大小可分为低压方波与高压方波。

低压方波发生器一般采用舌簧管作高速开关, 产生数百伏电压, t_1 达 2ns , 频率几十到数百赫兹, 用高灵敏度的通用示波器, 可测到重复稳定的波形。

高压方波发生器用放电

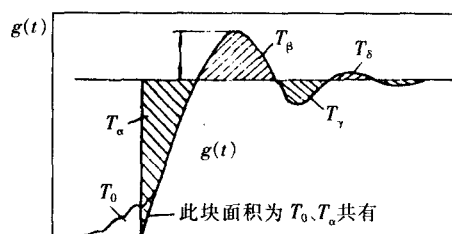


图 D-18 响应参数的定义

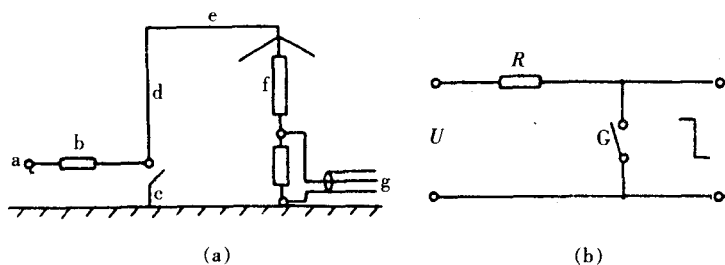


图 D-19 单位方波响应法

a—接直流电源或冲击电压发生器 b—电阻器 c—方波发生器 d—垂直引线
e—水平引线 f—分压器 g—接示波器 G—产生方波的间隙

陡化间隙,间距1mm~2mm,置于变压器油或压缩气体中,提高放电电压陡度,可产生10kV~100kV, t_i 为数纳秒的单次脉冲,需用高压示波器记录。

由于试验中附加了一根垂直引线 d 与水平引线 e , 所求得响应称为: 试验单位方波响应时间 T_N 。所以 $T_N = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma \dots$ (D-22)

剩余响应时间 $T_R(t_i)$, 为试验响应时间和 t_i 时刻的方波响应积分之差:

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) = T_N - \int_{0_i}^{t_i} [1 - g(t)] dt \quad (D-23)$$

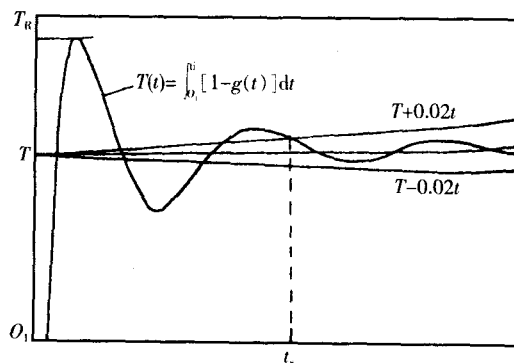
稳定时间 t_s (见图D-20) 为使剩余响应时间 $T_R(t_s)$ 等于和小于 $2\%t_s$ 的最短时间, 即:

$$\left| \int_{t_s}^{\infty} [1 - g(t)] dt \right| \leq 0.02t_s \quad (D-24)$$

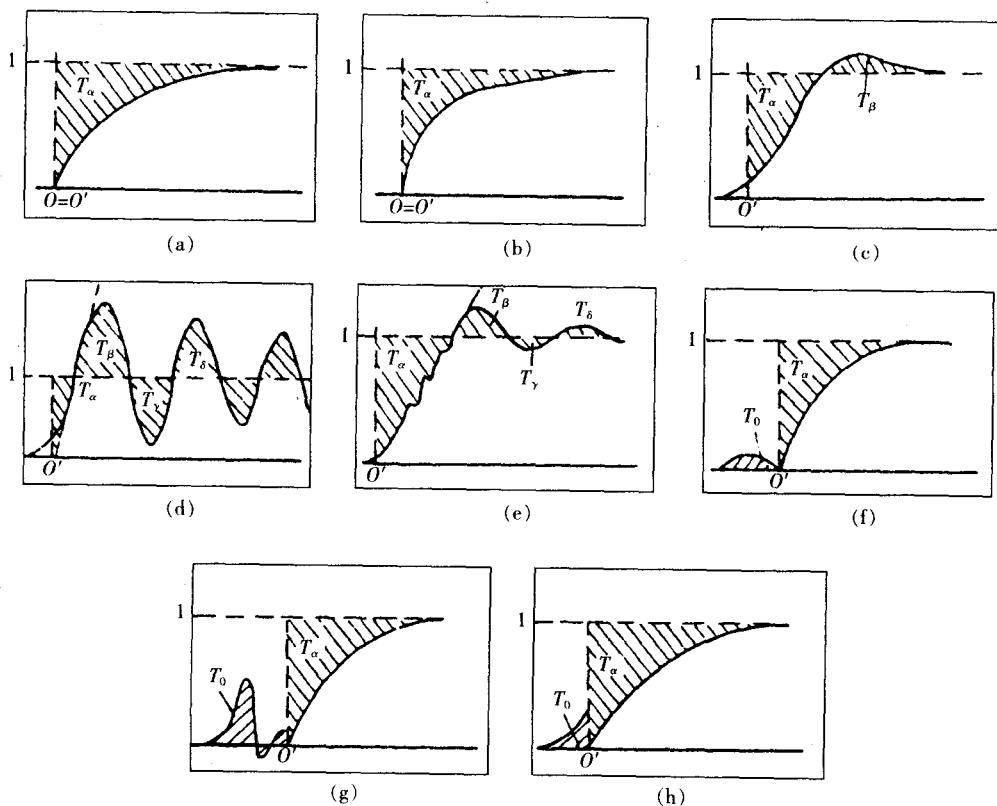
图D-21为典型方波响应示波图, 由于试验时包括了垂直引线 d 与水平引线 e , 就分压器方波响应时间来讲, 应该除去这两段引线的时间影响。

$t_v(1 - \frac{Z}{R})$, $t_h(1 - \frac{Z}{R})$ 分别为垂直与水平引线的影响。

式中 t_v , t_h 为沿垂直与水平引线的传播时间,



图D-20 相对于 $T(t)$ 的响应参数的定义



图D-21 典型的方波响应 $G(t)$ 示波

分别为 $t_v=h_v/c$, $t_h=l/c$, h_v 与 l 为相应引线长度(m), c 为电磁波传播速度($300\text{m}/\mu\text{s}$); R 为分压器电阻, 对电容式与串联电容式 $R=\infty$; Z 为垂直引线波阻抗, 在实际使用中, 可认为等于垂直引线同高度的水平引线波阻抗:

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{4h'}{D} \quad (\text{D-25})$$

式中 D ——引线直径, m;

h' ——水平引线高度, m;

μ_0 ——真空中磁导率为 $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$;

ϵ_0 ——真空中介电系数为 $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

这样, 分压器的响应时间:

$$T = T_N + t_v \left(1 - \frac{Z}{R}\right) + t_h \left(1 - \frac{Z}{R}\right) \quad (\text{D-26})$$

上式应该减去两项, 由于引线有电感, 响应波形为振荡式, 使得波前变陡, T_N 减小, 故取加号以补偿。

图D-21中 T_a 为部分响应时间, T_0 为初始畸变时间, 分别由图D-21c~h与f、g、h所示面积表示。其中c、d、e响应波形有振荡, 是由于入端未接阻尼电阻之故。在实际试验中需接入电阻, 这种振荡即可避免, 即均变为图D-21(a)、(b)形状, 从而使响应时间有所增加, 这是无法改变的。在实际试验中, 必须有一段水平引线, 因而还必须按实际引线长度增加一段 $t_h(1 - \frac{Z}{R})$ 作为整体测量系统的响应时间。

对方波要求: 上升时间为1/10测到的响应时间, 其内阻应小于被测试系统内阻的0.1%, 对全波和 $2\mu\text{s}$ 后截断波测量系统, 其方波响应在 $0.5t_{\min}$ 到 $2t_{\max}$ 时间段中应保持稳定在1%之内, 且在 $0.5t_{\min}$ 到 $T_{2\max}$ 之间变化小于5%; 对 $0.5\mu\text{s}$ 到 $2\mu\text{s}$ 截断波测量系统, 其方波响应在 $0.5t_{\min}$ 到 t_{\max} 时间段也应稳定在 $\pm 3\%$ 之内; 对波前截断, 稳定时间还应达到 $t_s \leq T_c$; 实验响应时间应满足: $T_a - KT_c \leq T \leq KT_c$ ($K=0.03$); 起始畸变时间 $T_0 \leq 0.005T_c$ 。

响应时间与误差的关系如图D-22所示, 对全波幅值误差很小, 波形延迟一个 T' 时间(见图D-22(c)), 对截波幅值误差(见图D-22(a))为 $\delta = ST$, 式中 S 为斜角波或外加电压的陡度。

线性上升的外施加电压, 截断时间误差(见图D-22(b))为 $\delta_t = T$

对波前截断冲击, 若达到峰值以前发生畸变(见图D-22(d)), 测量误差为 $\delta \approx S_L \cdot T$

部分响应时间与误差的关系为

$$\alpha \approx \sqrt{1 + (2\pi f T_a)^2} \quad (\text{D-27})$$

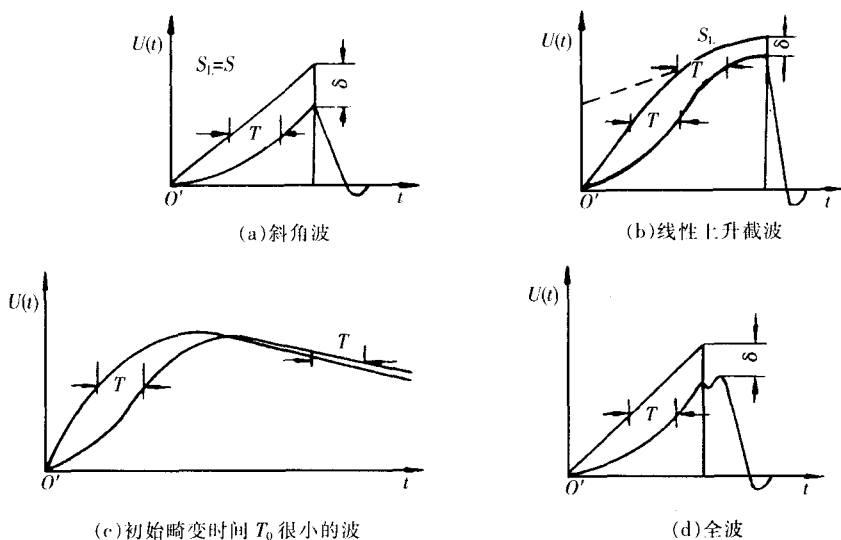
式中 α ——衰减系数, 即振荡的真实幅值与测量幅值之比;

f ——振荡的频率。

部分响应时间 T_a 和最高频率 f_{\max} 应满足下列二式要求:

$$T_a \leq \frac{2}{\pi f_{\max}} \quad (\text{D-28})$$

$$f \leq \frac{1}{4\pi T_a} \quad (\text{D-29})$$



图D-22 在实际测量中的响应时间和测量误差

上式 f_{\max} 为试验回路可能出现的最高频率 f_{\max} , 其保守估计:

$$f_{\max} = \frac{75}{H_g + H_c} \quad (D-30)$$

式中 H_g ——发生器高度, m;

H_c ——波头电容器高度, m。

冲击试验规定电压峰值处振荡不能超过5%, 如在实际试验中存在频率为 f_{\max} , 幅值为5%的高频振荡, 为了能够分辨, 在示波图上的幅值应不小于1%, 使测量系统能够察觉, 这样就要要求 f_{\max} 传递不小于20%, 即式(D-27) $\alpha \leq 5$ 。式(D-29)保证测量系统对最高记录频率 f 的传递百分比不小于90%, 这时 α 值偏离1不多, 记录到的振幅不需校正。例如 $T_a = 50\text{ns}$, 按式(D-27)可算得 $f_{\max} = 15.6\text{MHz}$, 而波幅处振荡频率 f 为 $0.1 \sim 1\text{MHz}$, 所以当 f_{\max} 衰减5倍时, 一般 f 几乎不衰减, 即回路产生5%振荡, 测量示波器亦得到5%振荡。

初始畸变时间 T_0 (见图D-18) 会引起附加误差, 但目前尚无校正导则, 只要求 T_0 小于一定数值, 使得误差可以忽略不计, 即 $T_0 \leq 0.005T_c = 10\text{ns} \sim 30\text{ns}$ (T_c 为截断时间 $2\text{ns} \sim 6\mu\text{s}$)。如满足不了此要求, 必须对测量系统进行改进。

3.2.2.2 幅频响应 $G(f)$

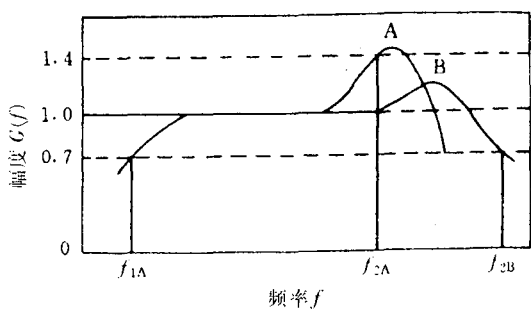
有关文献中也采用了幅频响应方法, 即向测量系统输入频率为 f (可变化的) 正弦信号, 其输出信号与输入信号之比对频率的函数关系为幅频响应特性, 理想的幅频响应为一直线, 从直流 ($f=0$) 至特高频 (几十兆赫), 即响应与频率无关, 但实际上由于 R, L, C 的存在, 只能在一定的频率范围内无关 (即传递不失真), 实际上两头均要变化, 典型的如图D-23(a)所示, 实际的如图D-23(b)所示。

频率传递在 $f_1 \sim f_2$ 之间, f_1, f_2 为下、上限, 失真3dB, 即降低到0.7或升高到1.4。

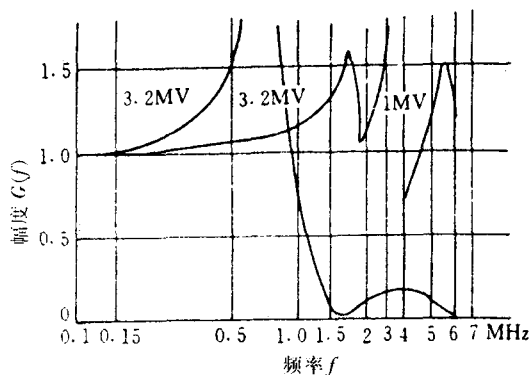
$G(t)$ 与 $G(f)$ 校正可任选其一, 或二者均进行, 视具体条件而定。

3.2.2.3 比对校正方法

有关文献中提出了: 标准测量系统、认可的标准测量系统与认可测量系统。标准测量系统具有足够的准确度与稳定性, 即响应时间及误差足够小 (标准无规定, 作者认为 $T < 5\mu\text{s}$, 全波 $\delta_u < 0.1\%$, 在



(a) 典型的



(b) 实际的(一台3.2MV, 另一台1MV)

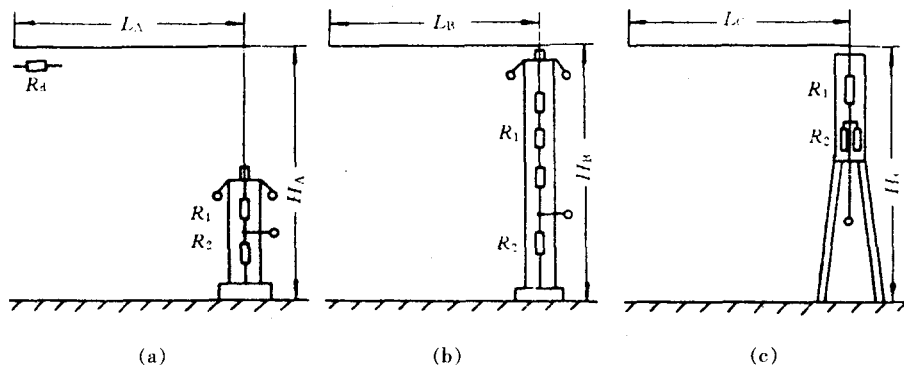
图D-23 幅频响应 $G(f)$ 特性

曲线A—频率上限 f_{2A} 和频率下限 f_{1A} 曲线B—幅频特性平坦, 下限频率直到直流电压

$T_c=1.5\mu s \sim 0.5\mu s$ 截断时, $\delta_v \leq 0.3\%$, 全波时间误差 $\delta_t < 0.5$, 所列 δ_u 、 δ_v 、 δ_t 均为比对误差); 认可标准测量系统即认证试验室中的标准测量系统, 它至少需要同另一个认证试验中同等标准测量系统进行过比对溯源; 认可的测量系统要在几个方面连续不断地满足本标准规定的一种或多种技术要求; IEC还规定了IEC标准测量装置(IEC standard Measuring Device), 即一种已知准确度的测量高压装置(如球隙及棒—棒间隙), 这样有关文献就把比对法作为校正的主要方法用到直流、交流、冲击波及操作波测量中来。

1987年9月至1989年12月之间, 欧洲共同体7国(德国、法国、意大利、荷兰、英国、葡萄牙、西班牙)进行了冲击电压测量系统的国际比对, 后澳大利亚、日本、中国也参加了国际比对。

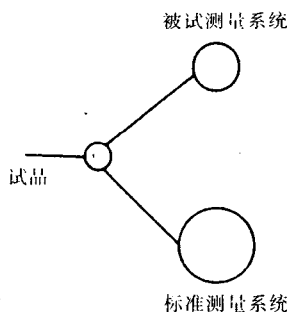
比对采用电阻分压器, 标准测量系统a由德国PTB研究院提供, 高1.1m, $R_1=8k\Omega$, $R_2=75\Omega$, 300kV; 被认可系统b(PTB)高2.8m, $R_1=8.4k\Omega$, $R_2=75\Omega$, 1MV; 被认可系统c(西安交大), $R_1=10k\Omega$, $R_2=50\Omega$; 比对按图D-24, 分 $R_u=0$ 与 $R_u=200\Omega$ 两种情况进行。



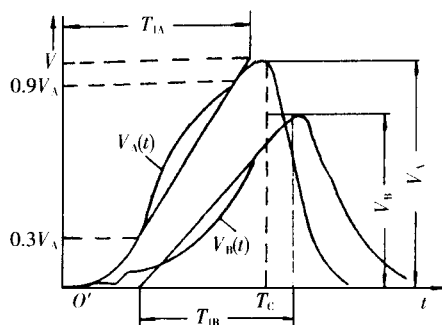
图D-24 比对分压器A、B、C

首先进行分压比与刻度系统校正, 然后按标准进行比对试验(见图D-25), 以A无误差求B或C的峰值差异:

$$\delta_u(T_c) = \frac{V_B - V_A}{V_A} \text{ 或 } \frac{V_C - V_A}{V_A}$$



图D-25 标准比对



图D-26 分压器A与B比对

波前时间差异： $\delta_t(T_c) = \frac{T_{IB} - T_{IA}}{T_{IA}}$ 或 $\frac{T_{IC} - T_{IA}}{T_{IA}}$ 如图D-26所示。具体结果见表D-3、表D-4。其中电压幅值与波前时间均按20次测量结果算出平均值与标准偏差 ($\sigma_u \times 10^{-2}$ 、 $\sigma_p \times 10^{-2}$)。

表D-3 A与B比对结果

R_d/Ω	$T_f/\mu s$	$\delta_u/\%$	$\sigma_u \times 10^{-2}$	$\delta_p/\%$	$\sigma_p \times 10^{-2}$
0	全波	-0.24	0.52	-1.36	0.72
	1.5	-0.09	0.24	-0.72	0.69
	1.0	-0.27	0.24	-2.16	1.38
	0.5	-2.70	0.39	—	2.08
200	全波	-0.08	0.25	0.46	0.70
	1.5	-0.16	0.29	-1.38	1.06
	1.0	-0.06	0.18	-2.63	1.68
	0.5	-1.89	0.24	—	2.33

表D-4 A与C比对结果

R_d/Ω	$T_f/\mu s$	$\delta_u/\%$	$\sigma_u \times 10^{-2}$	$\delta_p/\%$	$\sigma_p \times 10^{-2}$
0	全波	0.33	0.54	0.88	0.90
	1.5	-0.08	0.39	-1.55	1.39
	1.0	0.31	0.46	-2.31	1.76
	0.5	0.83	0.75	—	2.02
200	全波	0.11	0.17	1.47	-0.99
	1.5	0.14	0.40	-1.73	1.01
	1.0	0.47	0.35	-1.67	1.38
	0.5	0.95	0.51	-3.37	2.34

欧共体大多数国家同意A与B比对全波峰值电压平均误差在0.2%以内，在 $T_c = 1.5\mu s \sim 0.5\mu s$ 截波下的峰值误差为 $\pm(0.5 \sim 2)\%$ ，在全波及截波下的波前时间误差为 $\pm 3.5\%$ ，按此要求表D-3、表D-4中的 $T_c = 0.5\mu s$ 尚达不到。

4 直流电压发生器

4.1 对直流电压发生器的技术要求

- (1)脉动率或称纹波， $\pm 2.5\% < \pm 5\%$ IEC 标准要求；
- (2)一旦闪络，不得自行熄弧；
- (3)合理的充电时间，数分钟可以接受；
- (4)如做 HVDC 换流变压器，发生器还要能极性反转。

以上是试一般的及 HVDC 换流变压器的要求。如试绝缘子、套管，在此一并提及还要求湿试，吸收 10mA，不得超过出口压降，污试，要 500ms $\Delta U \leq 5\%$ ，每个脉冲压降 $\leq 5\%/s$ 。

直流电压发生器超过 400kV 要做成串级直流高压装置。它由四个基本参数表示：电压降 ΔU ，平均输出电压 $U_{\text{平均}}$ ；平均输出电流和电压脉动（纹波）系数。

4.2 直流电压发生器的原理

直流电压发生器空载电压 U_0 ，压降 ΔU 及平均电压与脉动如图 D-27 所示。

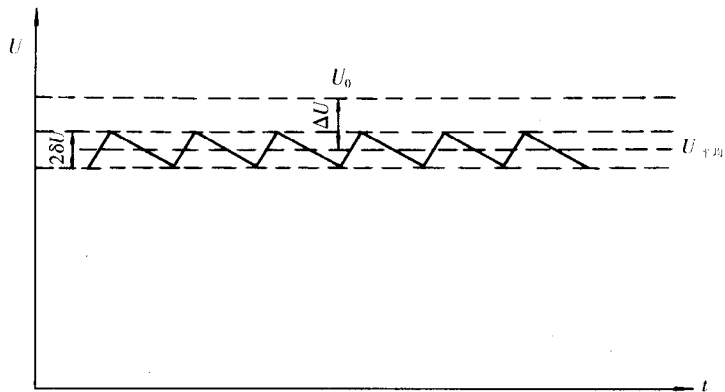


图 D-27 整流空载电压 U_0 、平均输出电压 $U_{\text{平均}}$ 、平均压降 ΔU 和脉动率 δU 的示意图

有两项重要参数指标：

$$\delta U = \frac{I}{f} \cdot d$$

$$\Delta U = \frac{I}{f} \cdot D$$

式中 I ——发生器输出电流, A;

f ——充电变压器频率, Hz;

d, D ——与发生器参数有关的参数。

一台 3 级串级整流发生器如图 D-28 所示, 为常用、单相、单脉冲用 AC、峰值为 U 、频率为 f 的电源经整流器整流, 电流 I 由整流器相应的电荷 $q = \frac{I}{f}$ 在其同期的输出, 图 D-28 右边为平整稳定柱以电容 C_v 表示, 左边为耦合(整流)柱以 C_v' 表示, 予以补充电荷(电流), U_v 与 U_v' 则表示对地的电压。

要考虑到两个瞬间, $t=0$ 对应负半波峰值时间; $t=1$ 则对应正半波峰值时间。一般可以认为在 $t=0$ 电荷由左柱经二极管向右柱充电, 反过来在反极性 $t=1$, 则由右柱经二极管向左柱充电, 如二极管考虑为理想的, 变压器电阻可略去不计, 则 U_{v0} 表示 $t=0$ 和 U_{v1} 为 $t=1$, 则:

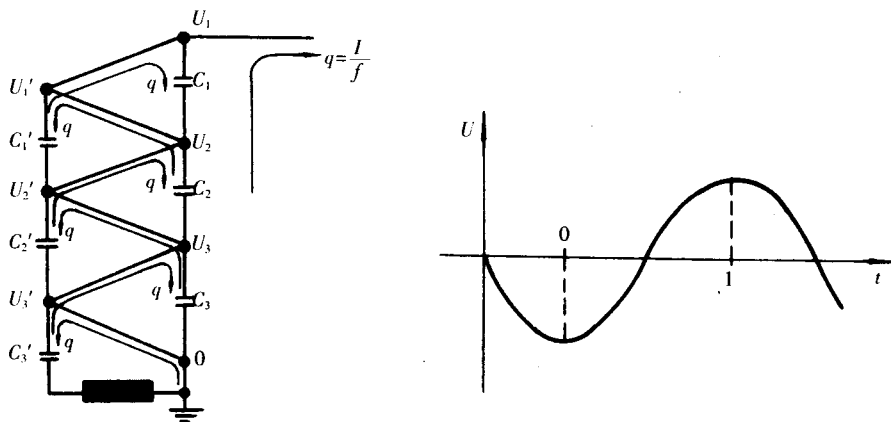


图 D-28 三级串级整流发生器

$$U_{30}'=0$$

$$U_{31}'=U_{31}=2U-\frac{3q}{C_3'}$$

$$U_{30}=U_{31}'-\frac{2.5q}{C_3}=2U-\frac{3q}{C_3'}-\frac{2.5q}{C_3}$$

$$U_{20}'=U_{30}$$

$$U_{21}'=U_{21}=U_{30}+2U-\frac{3q}{C_3'}-\frac{2q}{C_2'}=4U-\frac{6q}{C_3'}-\frac{2q}{C_2'}-\frac{2.5q}{C_3}$$

$$U_{20}=U_{21}'-\frac{2.5q}{C_3}-\frac{1.5q}{C_2}=4U-\frac{6q}{C_3'}-\frac{2q}{C_2'}-\frac{5q}{C_3}-\frac{1.5q}{C_2}$$

$$U_{10}=U_{20}$$

$$U_{11}'=U_{11}=U_{20}+2U-\frac{3q}{C_3'}-\frac{2q}{C_2'}-\frac{q}{C_1'}=6U-\frac{9q}{C_3'}-\frac{4q}{C_2'}-\frac{q}{C_1'}-\frac{5q}{C_3}-\frac{1.5q}{C_2}$$

电压 U_{11} 在 $t=1$ 时为最大输出电压, 此刻最低输出电压则为:

$$U_{1\min}=U_{11}-\frac{3q}{C_3'}-\frac{2q}{C_2'}-\frac{q}{C_1'}$$

写成任意级数, 则方程式为:

$$U_{1\max}=2N \cdot U - \frac{I}{f} \left(\sum_1^N \frac{V^2}{C_V'} + \sum_1^{N-1} \frac{V^2 + \frac{V}{2}}{C_{V+1}} \right)$$

$$U_{1\min}=U_{1\max}-\frac{I}{f} \sum_1^N \frac{V}{C_V}$$

于是得出:

$$d=\frac{1}{2} \sum_1^N \frac{V}{C_V}$$

$$D=\sum_1^{N-1} \frac{V^2 + \frac{V}{2}}{C_{V+1}} + \sum_1^N \frac{V}{C_V} + \sum_1^N \frac{V^2}{C_V'} = \sum_1^{N-1} \frac{V^2 - V + \frac{1}{2}}{C_V} + \sum_1^N \frac{V^2}{C_V'}$$

如发生器为单相、二脉冲, 则 $q=\frac{I}{f \cdot P}$, 式中 P 为脉冲数, 此处 $=2$, 其他可类推。

4.3 直流电压发生器的充电线路

几种发生器充电线路见图 D-29~图 D-32。

(1) 图 D-29 为单相单脉冲充电

线路。

一般情况下

$$d=\frac{1}{2} \sum_1^N \frac{V}{C_V}$$

$$D=\sum_1^{N-1} \frac{V^2 - V + \frac{1}{2}}{C_V} + \sum_1^N \frac{V^2}{C_V'}$$

当 $C_V'=C_V=C$, $C_N'=2C$ 时

$$d=\frac{N}{4C} (N+1)$$

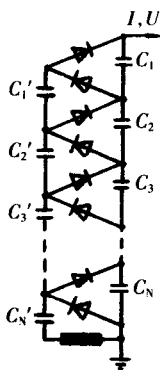


图 D-29 单相单脉冲

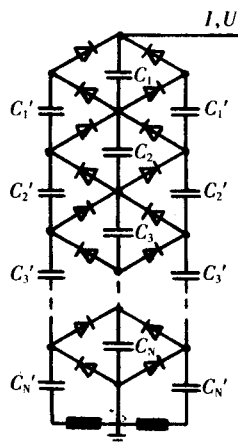


图 D-30 单相双脉冲 (C_N 在内)

$$D = \frac{N}{3C} (2N^2 + 1)$$

(2) 图 D-30 为单相双脉冲 (C_N 在内) 充电线路。

一般情况下:

$$d = \frac{1}{4} \sum_1^N \frac{V}{C_V}$$

$$D = \frac{1}{4} \sum_1^N \frac{1}{C_V} + \frac{1}{2} \sum_1^N \frac{V^2}{C_V'}$$

在 $C_V' = C_V = C, C_N' = 2C$ 时

$$d = \frac{1}{4C}$$

$$D = \frac{N}{3C} \left(\frac{N^2}{2} + 1 \right)$$

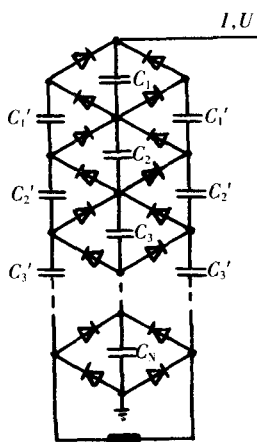


图 D-31 单相双脉冲

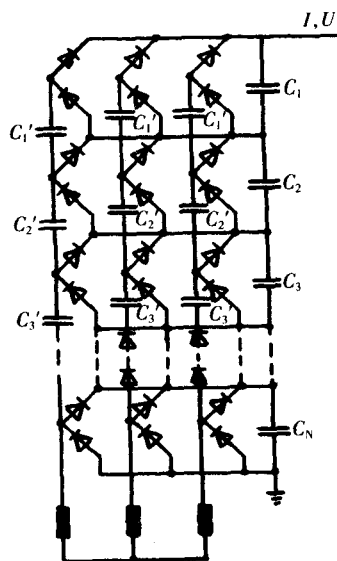


图 D-32 三相六脉冲

(3) 图 D-31 为单相双脉冲充电线路。一般情况下:

$$d = \frac{1}{4} \sum_1^N \frac{V}{C_V}$$

$$D = \frac{1}{4} \sum_1^N \frac{1}{C_V} + \frac{1}{2} \sum_1^{N-1} \frac{V^2}{C_V'}$$

当 $C_V' = C_V = C$ 时

$$d = \frac{N}{4C}$$

$$D = \frac{N}{3C} \left(\frac{N^2}{2} - \frac{3N}{4} + 1 \right)$$

(4) 图 D-32 为三相六脉冲充电线路。一般情况下:

$$d = \frac{1}{12} \sum_1^N \frac{1}{C_V}$$

$$D = \frac{1}{12} \sum_1^N \frac{1}{C_V} + \frac{1}{6} \sum_1^{N-1} \frac{V^2}{C_V'}$$

当 $C_V' = C_V = C$ 时

$$d = \frac{N}{12C}$$

$$D = \frac{N}{3C} \left(\frac{N^2}{6} - \frac{N}{4} + \frac{1}{3} \right)$$

4.4 2000kV 直流电压发生器实例

4.4.1 2000kV 直流电压发生器电气参数

该 2000kV 直流电压发生器由瑞士 Heafely 公司制造,并可作为 2000kV 装置用,又可安装成两台 1000kV 的直流电压发生器,进行正负极性电压作用下介质试验。

该装置作为 2000kV 直流电压发生器时的技术参数。

(1) 一般数据:

空载电压: $u_0 = 2400\text{kV}$

级数: $N=6$

回路布置: 不对称布置

级电压 ($\delta=1$): $u_s=400\text{kV}$

输出电压 ($I=20\text{mA}$ 时): $u_g=2\ 000\text{kV}$

额定电流 (连续): $I_n=20\text{mA}$

纹波系数: $r\leq 3\%$

极性转换: 液压及手动

使用温度范围: $-5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$

(2) 高压变压器, 两台 TEOS150/30 型并联:

额定功率: $s=60\text{kVA}$

原方: $u_1=380\text{V}$, $I_1=158\text{A}$

副方: $u_2=150\text{kV}$, $I_2=400\text{mA}$

(3) 高压硅堆 12 个:

反峰电压: $u_s=400\text{kV}$

正向电流: $I=50\text{mA}$

(4) 下保护球隙:

球隙直径: $S_{F1}=250\text{mm}$

保护电阻: $R_{18}=25\text{k}\Omega$

(5) 整流电容:

$C_{18}=220\text{nF}$, $u=200\text{kV}$ 1 台

$C_{19}=110\text{nF}$, $u=400\text{kV}$ 5 台

(6) 平整电容:

$C_{20}=110\text{nF}$, $u=400\text{kV}$ 6 台

(7) 上保护球隙:

球隙直径: $S_{F2}=500\text{mm}$

(8) 平整电容与接地开关之间阻尼电阻:

总电阻 (6 段): $R_{23}=100\text{k}\Omega$

电流 (连续通过): $I=20\text{mA}$

1.2/50 μs 波耐压: $u=2\ 400\text{kV}$

(9) 接地开关:

每段额定电压: $u=400\text{kV}$

每段接地电阻: $R_{22}=10\Omega$, $W=10\text{kJ}$

(10) 直流分压器:

总的高压臂电阻: $4\ 800\text{M}\Omega$

每段高压臂电阻 (共 6 段): $R_{21}=800\text{M}\Omega$, $u=400\text{kV}$ (DC)

每段高压臂电容 (共 6 段): $C_{21}=1\ 200\text{pF}$

测量电流: $I_M=500\mu\text{A}$

(11) 接地开关与试品之间的阻尼电阻:

总电阻 (共 2 段): $R_{24}=0.2\text{k}\Omega$

(12) 可控硅 (SCR):

联接电压: $u=380\text{V}$

频率: $f=50\text{Hz}$

主开关接触器: 60A

保险丝: $\int i^2 dt = 7\,900\text{A}^2 \cdot \text{s}; 315\text{A}$

可控硅管: $1\,200\text{V}, 190\text{A}$

TS_F 联接: $R_{14}=34\Omega\ 10\text{W}$

$C_{14}=0.24\mu\text{F}\ 400\text{V}$

去磁电阻: $R_{16}=33\Omega\ 9\text{A}$

2 000kV 直流电压发生器接线图见图 D-33。

当发生器作为 1 000kV 直流发生器使用时,其技术参数如下,其接线图见图 D-34。

空载电压: $u_0=1\,200\text{kV}$

级数: 3

输出电压 ($I=25\text{mA}$ 时): $u_g=1\,000\text{kV}$

额定电流 I_m : 25mA

直流分压器

高压侧总电阻: $2\,400\text{M}\Omega$

高压侧总电容: 400pF

测量电流 I_m : $500\mu\text{A}$

4.4.2 直流串级装置过电流及过电压的防止

当串级直流装置的外部负载或内部元件发生击穿(或闪络)时,在串级装置内部有可能出现过电压或过电流。

高压硅整流器是串级直流装置的最薄弱元件,在过电流和过电压作用下容易损坏。

试验表明,负载(或被试品)突然短路是产生过电压和过电流的最严重情况。

图 D-35(a)、(b)、(c)说明了产生过电流、过电压的原因及防止措施。

如果串级直流装置没有任何限流电阻,当负载突然短路时,左柱电容 C_1' 、 C_2' 和 C_3' 串联起来经过 D_1 和 D_4' 对负载放电(见图 D-35(a)),这时强大的放电电流使 D_1 和 D_4' 烧坏。如果与 D_1 和 D_4' 高压硅整流串接一个限流电阻 R_1 (见图 D-35(b)),并且电阻值足够大时,可以将通过 D_1 和 D_4' 的放电电流限制在允许范围内。但是,放电电流在限流电阻 R_1 产生的电压降近 $(n-1)U_m$ 。这个压降分别作用到相邻的高压硅整流器 D_1 和 D_4' ,以及变压器高压绕组上,产生很高的过电压。串级装置的级数愈高,则过电压愈高。

如果在本体的外面与负载串联一个保护电阻 R_0 ,并且使比值 R_0/R_1 足够大时,则过电流和过电压可限制在允许范围内(见图 D-35(c))。

当某一电容器发生击穿时,高压硅整流器也会出现过电流,例如电容器 C_2 击穿时, D_2 过电流最大,为了限制电容器短路时产生的过电流,每一高压硅整流器须接一个限流电阻 R_1 。

外保护电阻 R_0 应具有足够的绝缘强度,当负载放电时,外保护电阻应能承受 $2nU_m$ 电压而不发生闪络。为了防止意外,还装有两对球隙 $G_1(\text{SF}_1)$ 和 $G_2(\text{SF}_2)$ 保护高压硅整流器和充电变压器。

4.4.3 输出电压的纹波 r 和电压降 ΔU

纹波 r 和电压降 ΔU 是直流试验系统的两个重要特性因素。对于简单的直流串级装置可用下面公式进行计算。其定义见图 D-36。

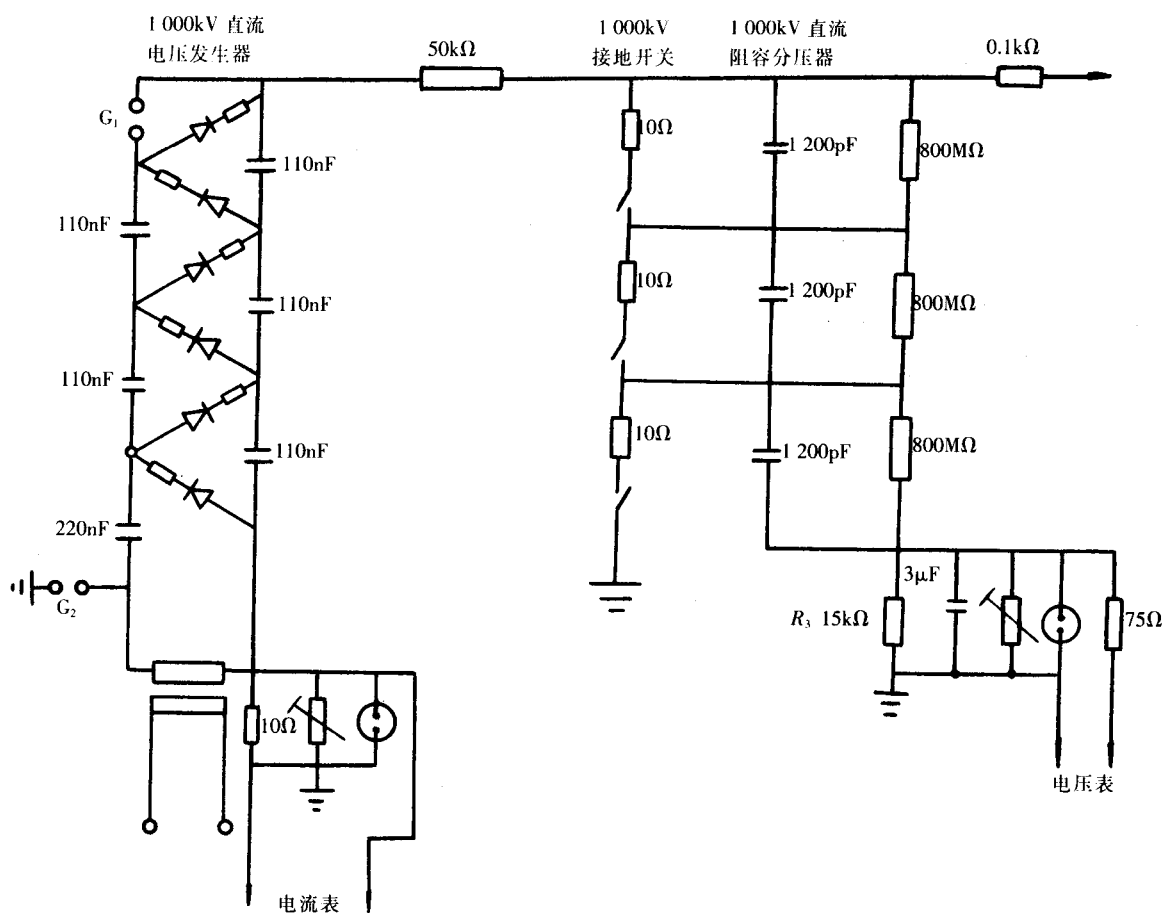


图 D-34 1 000kV 直流电压发生器接线图

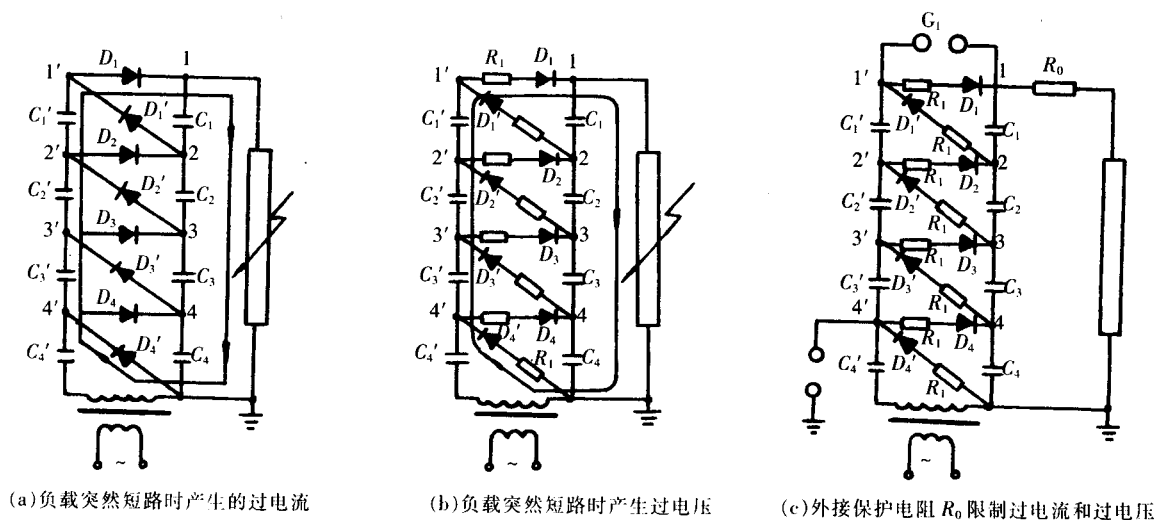


图 D-35 串联直流装置产生过电流、过电压过程

级电压总和 $U_0 = N \cdot U_T = N \cdot 2\sqrt{2} \cdot U_2$

输出电压 $U_k = U_0 - \Delta U$

纹波 $r = \frac{I}{f \cdot C} \cdot \frac{N}{4} \cdot (N+1)$

纹波系数(或电压脉动系数)

$$r\% = \frac{r \cdot 100}{U_k}$$

电压降 $\Delta U = \frac{I}{f \cdot C} \cdot \frac{N}{3} \cdot (2N^2 + 1)$

相对电压降 $\frac{\Delta U}{I} = \frac{1}{f \cdot C} \cdot \frac{N}{3} \cdot (2N^2 + 1)$

上述式中 I ——电流;

C ——级电容;

f ——频率;

N ——级数。

从上述公式中可以看出,电压降 ΔU 正比于直流电流,反比于频率 f 及级电容 C 。在恒定负荷时,纹波和电压降随串级装置级数的增加而增加。这意味着在一定的级数下对一指定的负荷 I ,不可能得到较高的输出电压。因而串级装置的级数是受限制的。经厂家比较,认为最佳级电压为 400kV。从实用且经济上讲,可生产高达 2.5MV 的串级直流装置。但目前世界上所用的最高电压的直流电压发生器为 2 000kV。

4.4.4 2 000kV 直流电压发生器的主要部件

直流电压发生器的主要部件包括:

①可控硅柜;②高压硅堆;③接地开关;④直流分压器;⑤高压电容器。

可控硅柜:可控硅柜用于进行直流试验电压的调节。可控硅柜包括有下列设备。

- 带热继电器的接触器 K_{10} ;
- 两只可控硅管 V_{14} 、 V_{15} ;
- 半导体熔断丝 F_{14} 及保护元件;
- 可控硅控制板 D_{13} ;
- 变流器 T_{21} 。

主接触器 K_{10} 将试验系统与电源进行电气上隔离,并在负荷过热时切除电源。可控硅管 V_{14} 、 V_{15} 可以连续调节输出电压,它们反相并联工作并由可变电阻 R_{141} — R_{141} 和熔丝 F_{14} 进行保护。它们还与 TSE 缓冲元件 R_{14} 、 C_{14} 相连。

可控硅控制板提供相位同步触发脉冲到两可控硅管,可控硅的实际工作点由控制桌上的直流电压来决定。

仪器用变流器 T_{21} 测量原方电流并引至电流表 P_{21} 。整个电源用避雷器 F_{15-17} 和电容器 C_{15-17} 进行保护。

去磁电阻 R_{16} 防止高压变压器由于可控硅引起的磁饱和。原方阻尼电阻 R_{17} 防止系统在击穿时引起的原方过电流(见图 D-37)。

高压硅堆:在高压硅堆中,高压变压器提供交流高压给串级装置,对于 400kVDC 的级电压应提供至少 $U = \frac{400}{2\sqrt{2}} = 141(\text{kV})$

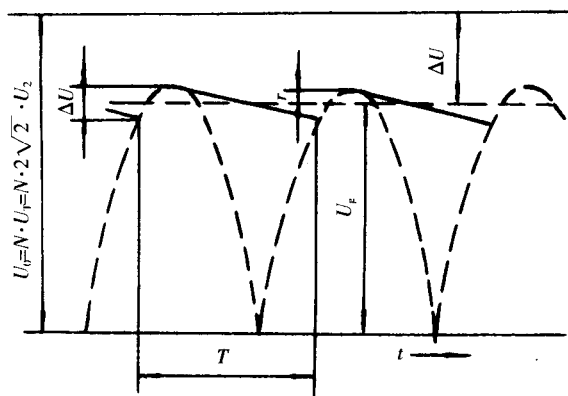


图 D-36 纹波 r 和电压降 ΔU 的定义

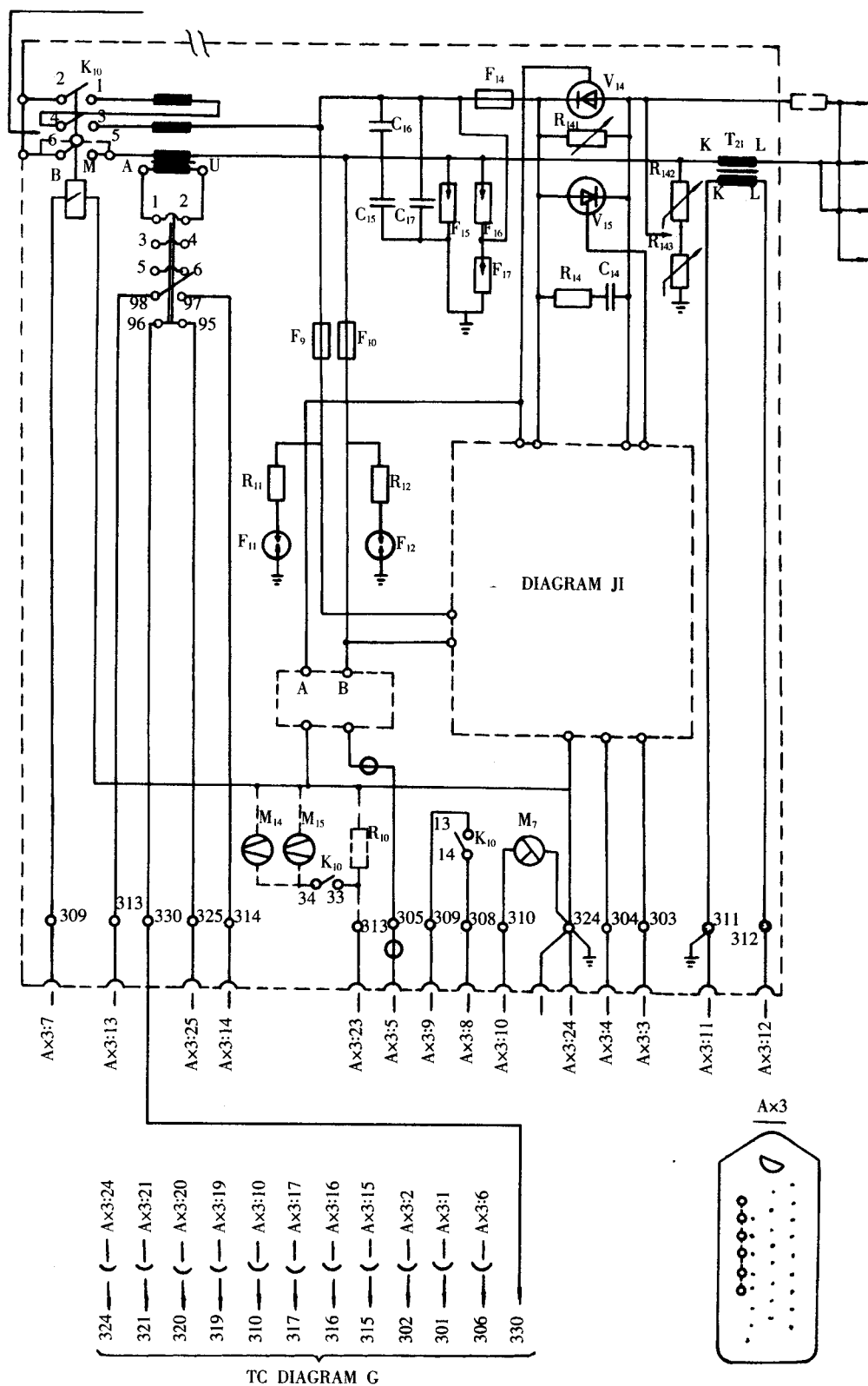


图 D-37 可控硅柜

分流器测量从接地返回到高压变压器的电流并送至电流表。高压变压器用下保护球隙和保护电阻来保护。

整流电容 C_{19} 和平整电容用不同样的电容数值。第一级整流电容 C_{18} 为 C_{19} 数值的两倍。高压硅堆的内部电阻、电容应该控制。每个高压硅堆之间有保护电阻。可采用液压或手动进行极性转换。采用液压转换极性时,在油箱内装有过滤器的油泵并有压力计及阀门。极性的转换的时间为 $5\text{s}\sim 10\text{s}$ 。上保护球隙用作高压硅堆的过电压保护。

直流串级装置与接地开关之间的阻尼电阻在闪络情况下可放掉整流电容及平整电容的电荷。

接地开关:接地开关用压缩空气进行操作。带有过滤器的压缩机和压力开关,安装在接地开关的底部。在旁边有一贮藏压缩空气的容器,以便万一没有电源时仍可将开关合到接地位置上。

试验时压缩机的活塞带动绝缘带将开关的接触片面上拉到不接地的位置并压缩接地弹簧。每段接地开关用绝缘棒相互连接。

接地开关用安装在底部的风扇通风。加热器与湿度调节器可防止接地开关绝缘筒内部形成水珠。

在每一段接地开关内有接地电阻,这个电阻可吸收储藏在试品中的部分能量。接地开关和试品之间的阻尼可吸收试品中剩余部分的储藏能量(见图 D-38)。

直流分压器:直流分压器是采用阻容式并联。 R_{21} 与 C_{21} 并联连接以便得到良好的瞬态传输特性。分压器使用高精确度的电阻制成。分压器测量的电流是 $500\mu\text{A}$ 。分压器的二次侧安装在分压器底部金属盒子内,二次侧包含有 R_3 和 C_3 ,匹配电阻 R_{301} 和保护元件。信号经过屏蔽电缆传到控制单元(见图 D-33 与图 D-37)。

高压电容器:高压电容器为胶木筒外管电容器。

附录 E 试验用发电机的选择与计算

1 概述

试验电源设备是变压器性能试验系统中的重要组成部分。采用同步发电机供电是规范、较佳的选择。有关标准规定,电压波形畸变率不大于 3%,而唯有发电机才能输出标准的正弦电压波。当然,由于受条件限制,也可用电网供电。对中、大型变压器制造厂来说,无疑应该备有两套发电机机组,一是工频同步发电机,一是中频同步发电机。总之,发电机的选择应本着经济、实用和发展的原则。

2 工频同步发电机机组

2.1 同步发电机

2.1.1 功率因数 $\cos\varphi$

变压器的空载 $\cos\varphi_0$ 及负载 $\cos\varphi_k$ 都是很小的,且随着容量的增大而减小。应以变压器的 $\cos\varphi_0$ 和 $\cos\varphi_k$ 来选择发电机的功率因数。功率因数见表 E-1。

表 E-1 变压器功率因数

S/kVA	1 600	6 300	20 000	63 000	120 000	240 000	360 000
$\cos\varphi_0$	0.18	0.18	0.15	0.17	0.11	0.13	0.14
$\cos\varphi_k$	0.23	0.12	0.05	0.04	0.023	0.0197	0.016 5

发电机的功率因数应选择滞后的低功率因数。换言之,需要提供很大的感性无功功率,较小的有功功率。这就是变压器试验电源的特点。这种低功率因数的同步发电机,相当于调相类型,完全可按其参数设计。

滞后的低功率因数发电机,由于电枢反应是去磁的,因此要求激磁绕组的激磁容量大。

国产试验用工频同步发电机组已经定型,已有数十年的运行实践,可适当选用。同步发电机功率因数见表 E-2。

表 E-2 同步发电机的功率因数

S/kVA	500	1 500	2 000	5 000	15 000	60 000
$\cos\varphi$	0.2	0.05~0.29	0.2	0.1	0.1	0

2.1.2 电压波形

做变压器空载试验时,施加电压应是正弦波电压,这是从铁心损耗测量准确性来考虑的。

$$\text{空载损耗 } P_0 = P_H + P_e \quad (\text{E-1})$$

$$\text{磁滞损耗 } P_H = \sigma_H \left(\frac{f}{100} \right) \left(\frac{B_m}{1\,000} \right)^{1.6} \text{ V} = \sigma_H \left(\frac{f}{100} \right) \left(\frac{U \times 10^{-8}}{4\,000 f n_1 A K} \right)^{1.6} \text{ V} \quad (\text{E-2})$$

$$\text{涡流损耗 } P_e = \sigma_e \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \frac{K B_m}{1\,000} \right)^2 \text{ V} = \sigma_e \left(\Delta \frac{f}{100} \cdot \frac{U \times 10^{-8}}{4\,000 f n_1 A} \right)^2 \text{ V} \quad (\text{E-3})$$






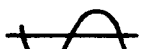
由式(E-2)、(E-3)可见:

磁滞损耗 P_H 与电压 U 的有效值的 1.6 次方成正比,而与施加电压波形系数 K 的 1.6 次方成反比。

涡流损耗与施加电压的 K 无关, 只与施加电压 U 的有效值的平方成正比。

典型波形系数见表 E-3。

表 E-3 典型的波形系数

电压曲线				波形因数
磁通曲线				
E	$4f\omega\Phi_m$	$4.44f\omega\Phi_m$	$4.62f\omega\Phi_m$	$K = \frac{E}{E_\psi}$
E_ψ	$4f\omega\Phi_m$	$4f\omega\Phi_m$	$4f\omega\Phi_m$	
K	1	1.11	1.155	

从表 E-3 可知, 波形系数 K 愈小, 磁通曲线愈锐, 电压曲线愈纯; 波形系数 K 愈大, 磁通曲线愈纯, 电压曲线愈锐。

虽然发电机的端电势 E 是正弦波, 但由于变压器铁心导磁特性的非线性致使励磁电流 I_0 变成非正弦波, 因此 I_0 流经电机定子绕组后引起非正弦压降, 该压降与 E 合成的电压 U 当然也是非正弦的。

此外, I_0 的波形还与变压器绕组的连接方式有关。图 E-1 是几种电流波形。

试验证明, 施加于被试变压器线端电压波形与励磁线电流波形具有相同特性。当励磁电流越大, 定子绕组阻抗越大, 则发电机输出电压畸变就越严重。因此空载损耗测量就会产生很大误差。下面根据 P_H 与 K 成反比的关系, 来具体分析误差的大小。

由于 I_0 是非正弦波, 它除了基波外, 还有 3 次、5 次谐波, 不同接法有不同的波形。对 D 接, 三相励磁时, 线电流呈马鞍状, 线电压亦具同样波形, $K > 1.11$, 表示畸变了的波形面积比正弦波要小, 对 Y 接, 三相励磁时, $K < 1.11$, 表示畸变了的波形面积比正弦波要大。而单相励磁比 D 接的 K 还要大些, 波形更畸变。见表 E-4。

为求 B_m , 把半个周期内的电压进行积分, 得

$$B_m = \frac{E_\psi(t_2 - t_1)}{ZNA}$$

式中 $(t_2 - t_1)$ 为半波的周期, 它等于 $\frac{1}{2}f$, 是一个常数。不论在任何畸变的波形情况下, B_m 总是同电压波形的面积, 亦即同电压的平均值成正比例的。因此采用平均值电压表和有效值电压表并联进行空载试验。

平均值电压表是经过整流电路接入的一种磁电式仪表, 一般以有效值来刻度。

$$\text{它的偏转角 } \alpha = \frac{BS\omega}{W} I_\psi = \frac{BS\omega}{W \cdot K} I$$

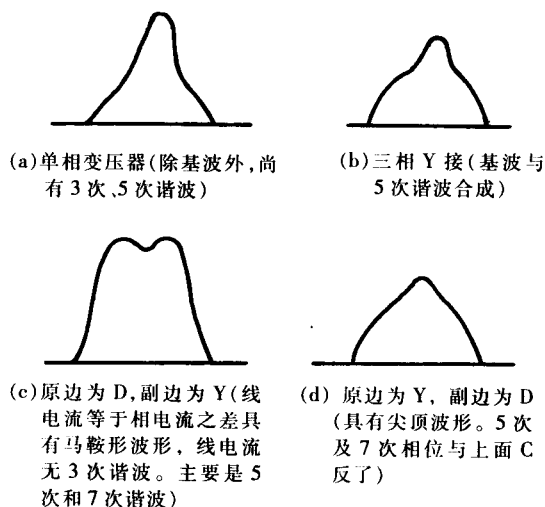


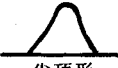


图 E-1 线电流波形

表 E-4 畸变的电压波形与空载损耗误差关系

变压器励磁方式	$U_{有效}$ 为准	$U_{平均}$ 比较	电压波形特点	K	B_m 比较	P_0 误差	电压波形成分
三相 D	U_H	$<U_H$	 马鞍形	>1.11	$<B_{lim}$	负	1.5 次
三相 Y	U_H	$>U_H$	 钝形	<1.11	$>B_{lim}$	正	1.5、7 次
一相	U_H	$<U_H$	 尖顶形	>1.11	$<B_{lim}$	负	1.3、5 次

它的准确度与被测量的波形 K 有关。

当两表指示相同时,则表示电压是正弦波,否则是非正弦波,电压畸变了。

由于一相励磁,电压波形畸变较三相 D 励磁的严重,空载损耗的负误差大得多。

从变压器空载试验的角度来看,当发电机的额定容量等于或大于被试变压器的励磁容量 5 倍时,基本能够满足施加电压波形的要求。

鉴于目前硅钢片性能很好,励磁电流非常小,因此以小发电机试验较大容量的变压器空载试验是完全可能的。

2.1.3 发电机容量的估计

变压器生产厂家选择机组时,首先应考虑所制造的变压器单台最大容量是多少,除能做例行试验外,还应能做温升试验。另外,当对已有了机组估计其试验能力时,这两种情况,计算是相同的。

2.1.3.1 所需试验容量

以能做变压器温升为依据

$$S_t = (I_0\% + u_k\%)S \times 1.2 \quad (E-4)$$

式中 $I_0\%$ ——变压器空载电流百分数;

$u_k\%$ ——变压器短路电压百分数;

S ——变压器额定容量, kVA;

1.2——裕度系数。

2.1.3.2 所需的有功功率

$$P = (P_0 + P_k) \times 1.2 \quad (E-5)$$

式中 P_0 ——变压器空载损耗;

P_k ——变压器负载损耗。

发电机必须满足 P 的要求。由 P 来考虑

$$S_g \cos \varphi = P \quad (E-6)$$

式中 S_g ——发电机额定容量。

2.1.3.3 电容补偿

若试验容量不够,应进行电容补偿,需要提高功率因数来解决。所需电容器的容量 Q 按下式计算:

$$Q = Q_1 - Q_2 = P \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) \quad (E-7)$$

式中 Q_1 ——补偿前的无功功率;

Q_2 ——补偿后的无功功率;

$\cos\varphi_1$ 、 $\cos\varphi_2$ ——补偿前、后的功率因数。

2.1.3.4 计算实例

以一中型变压器厂家为例, 要满足 63 000kVA110kV 变压器的性能试验, 应选择合适的发电机。

已知 $P_0=65\text{kW}$, $I_0\%=0.6$, $P_k=260\text{kW}$, $u_k\%=10.5$

(1)所需试验容量

$$S_t=(0.6\%+10.5\%)\times 63\,000=6\,993(\text{kVA})$$

(2)所需的有功功率

$$P=65+260=325(\text{kW})$$

$$(3)\cos\varphi_1=\frac{325}{6\,993}=0.046\,5$$

(4)若以 $\cos\varphi=0.2$ 滞后来选发电机, 则

$$S'_g=\frac{325}{0.2}=1\,625(\text{kVA})$$

考虑裕度时 $S_g=1\,625\times 1.2=1\,950(\text{kVA})$

故选 2 000kVA 发电机。

很明显, 尚缺少 $6\,993-2\,000=4\,993(\text{kVA})$

如果选用 7 500kVA 发电机是最合适的, 但投资太大。因此需要电容补偿来解决。

2.1.3.5 补偿计算

补偿原理见图 E-2。

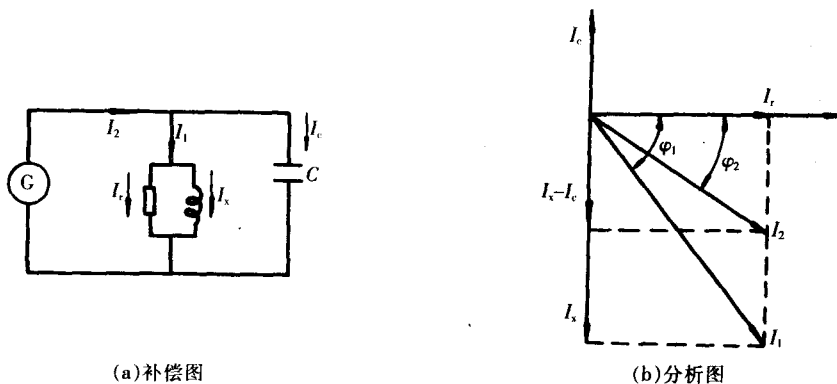


图 E-2 补偿原理图

(1)必须保持 $P=325\text{kW}$ (即 I_r 、 I_2 、 I_1 的轨迹在一条直线上)

(2)未补偿时, 发电机应供给电流为

$$I_1=6\,993/\sqrt{3}\times 110\times 10.5\%=350(\text{A})$$

$$\cos\varphi_1=\frac{325}{6\,993}=0.046\,5$$

(3)用电容 C 补偿后, 保持发电机输出 $I_{\text{gf}}=100\text{A}$, 即输出 2 000kVA, $I_2=I_{\text{gf}}=100\text{A}$, 则

$$\cos\varphi_2=\frac{325}{2\,000}=0.162\,5$$

(4)所需电容器的容量为

$$Q=325 \times \left(\sqrt{\frac{1}{0.0465^2}-1} - \sqrt{\frac{1}{0.1625^2}-1} \right) = 5008 (\text{kVA})$$

发电机的视在功率:

$$S'=325 \times \left(\frac{1}{0.0465} - \frac{1}{0.1625} \right) = 4988 (\text{kVA})$$

从上面计算可知,与前估计需要的容量 4993kVA 是接近的。

2.2 同步电动机

同步电动机的转速 n 与电网频率 f 间有着严格的关系。即:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (\text{E-8})$$

电动机的 n 不随负载的变化而变化。而异步电动机的转速 n 一般略小于同步速 n_1 , 并且随着负载的增加, 转速 n 略有降低。其转差

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (\text{E-9})$$

约在 0.02~0.05 左右。由于对试验电源频率 f 有着严格的要求, 唯有用同步电动机作原动机来带动发电机。

2.2.1 $\cos\varphi=0.8$ 以上(越前)运行

众所周知, 异步电动机从电网上吸收电感性的无功功率。而同步电动机在过励磁时吸收越前电流, 在欠励磁时吸收落后电流。欠励磁时过载能力较小。同步电动机能够以 $\cos\varphi=1$ 运行, 因而就不需要从电网吸取无功功率。一般是以满载时 $\cos\varphi=0.8$ 越前电流的运行来设计的。因此, 电动机除拖动发电机工作外, 还担负着发出电感性无功功率, 这样一来, 使得电网的功率因数改善了。这是它的主要优点, 这是异步电动机做不到的。

2.2.2 有较高的过载能力

过载能力用 k_m 表示

$$k_m = \frac{M_{\max}}{M_H} \quad (\text{E-10})$$

式中 M_{\max} ——电动机最大力矩;

M_H ——额定力矩;

$$M_{\max} = \frac{P_{\max}}{\Omega_1} = \frac{mU_c E_0}{\Omega_1 X_d} \quad (\text{E-11})$$

P_{\max} ——电动机的最大电磁功率;

Ω_1 ——电动机的同步角速度, $\Omega_1 = 2\pi \frac{n_1}{60}$;

X_d ——电动机的电抗。

M_{\max} 决定了同步电动机的静态稳定极限。

几种电动机的过载系数见表 E-5。

同步电动机的另一个重要的优点是: 有较大的

的气隙。而 X_d 又与气隙长度 δ 成反比, M_{\max} 与 X_d

成反比, 因此可使 M_{\max} 增加, 可获得大于 M_H 3~4 倍的 M_{\max} 。而在异步电动机中, 为提高它的过载能力而增大气隙, 势必使励磁电流上升, 造成额定负载下 $M_{\max} \cos\varphi$ 的大大变坏。

根据电动机拖动发电机的大小, 对过载能力要求也不一样。

表 E-5 同步电动机的过载系数

电动机 /kW	TD250-4	TD500-6	TZ-170/79-8 3050	2300
k_m	1.7	1.66	2.4	2.93

2.2.3 不受电网电压波动的影响

同步电动机对于电网电压波动的灵敏性较小,其最大转矩正比于电压的一次方,而异步电动机的最大转矩正比于电压的平方。这对发电机输出稳定很重要。

2.2.4 启动转矩很小

当把电动机接到交流电网时,当时它的转子还没有转动而且励磁绕组中有直流电流,转子是转不起来的,同步启动是不可能的。最简便的办法是采用异步启动,也就是把同步电动机作为异步电动机来启动。在转子上装有启动绕组,其启动特性和短路型异步电动机的启动特性几乎没有区别。因此它所要求的低 $\cos\varphi$ 的启动电流很大。同步电动机的异步启动,由启动电流 I_n 及启动转矩 M_n 和牵入同步转矩 M_e 所表征。

几种同步电动机的启动特性见表 E-6。

小型电动机用全压直接启动。但在许多单位采用 Yd 启动。

对大中型电动机,多采用降压启动。

表 E-6 同步电动机的启动特性(在额定电压下)

P_n /kW	TD-250	TD-500	MC-1140 850	TZ-170 3050	2300
$2p$	4	6	6	8	4
I_n/I_n	5.9	4.8	5	7.5	7.24
M_n/M_n	2.22	1.74	1.29	0.8	1.04
M_e/M_n	1.14	0.73	0.915	2.5	2.22

2.2.5 电动机功率的选择

电动机作原动机,它带动发电机做变压器温升试验是其输出的机械功率。

(1) 电动机的机械功率

$$P_m = P_1 - p_m \quad (E-12)$$

式中 P_1 ——从电网送入电动机功率;

P_m ——电磁功率;

p_m ——定子绕组铜耗。

机械功率: $P_2 = P_m - P_0$

(E-13)

式中 P_0 ——无载损耗(包括铁损耗和机械损耗);

P_2 ——带动发电机的机械功率。

(2) 发电机的功率

$$P_g = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_F + P_S \quad (E-14)$$

式中 P_g ——发电机总损耗;

P_{Cu1} ——定子铜耗;

P_{Cu2} ——转子铜耗;

P_{Fe} ——铁心损耗;

P_F ——机械损耗;

P_S ——摩擦损耗。

(3) 中间变压器的功率

$$P_{\Pi} = P_0 + P_k \quad (E-15)$$

式中 P_0 ——中间变压器的空载损耗;

P_k ——中间变压器的负载损耗。

(4) 被试变压器的功率

$$P_t = P_0 + P_k \quad (E-16)$$

(5) 电动机的功率估算

$$P_2 > (P_g + P_{\Pi} + P_t) \times 1.5$$

$$\text{效率 } n = \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{E-17})$$

2.2.6 举例

一厂家生产规模做到 120 000kVA110kV 级,需要订购工频同步发电机组。现估算如下:

(1)产品规格:

120 000kVA, $121 \pm 2 \times 2.5\% / 10.5$, YNd11, $P_0 = 106\text{kW}$, $I_0\% = 0.5\%$, $P_k = 422\text{kW}$, $u_k\% = 10.5$

所需试验容量为: $S_t = (0.5\% + 10.5\%) \times 120\,000 = 13\,200 (\text{kVA})$

所需有功功率, $P_t = 106 + 422 = 528 (\text{kW})$

$$\text{试品的 } \cos\varphi = \frac{528}{13\,200} = 0.04$$

(2)今选 15 000kVA 发电机,不用电容补偿,其 $\cos\varphi = 0.1$, 750r/min,

则输出有功功率 $P = 15\,000 \times 0.1 = 1\,500 (\text{kW})$

发电机总损耗 $P_g = 364 (\text{kW})$

(3)中间变压器 16 000kVA, $35 \pm 2 \times 2.5\% / 6.3$

$$P_{\text{II}} = 19 + 77 = 96 (\text{kW})$$

(4)同步电动机轴上功率估算:

$$P_2 > (P_g + P_{\text{II}} + P_t) \times 1.5 = (364 + 96 + 528) \times 1.5 = 988 \times 1.5 = 1\,482 (\text{kW})$$

(5)为了安全可靠,同时考虑发展。选用 3 000kVA, $\cos\varphi = 0.8$, 2 300kW, 750r/min 的同步电动机,同步电动机的损耗如下:

定子绕组铜耗 $p_m = 26.8 (\text{kW})$

无载损耗 $P_0 = 78.2 (\text{kW})$

电动机的机械功率 $P_2 = 2\,300 - 26.8 - 78.2 = 2\,195 (\text{kW})$

$$\text{安全系数 } k = \frac{2\,195}{988} = 2.22$$

$$\text{电动机的效率 } n = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2\,195}{2\,300} = 0.95$$

以上计算表明:用 15 000kVA 发电机配同步电动机 2 300kW 的同步发电机组,完全能满足 120 000kVA110kV~220kV 变压器,不用电容补偿时的温升试验。当然有电容补偿就更能增大试验能力了。

3 中频发电机组

做变压器内绝缘感应试验时,为了减少铁心的磁密,减少励磁电流,必须提高供电频率,采用中频发电机供电是最简便、有效的方式。

3.1 中频发电机

3.1.1 频率 f 的选择

做中小型变压器感应试验时,一般选用 100Hz 发电机。对于大型、特型变压器的感应试验,在“内绝缘感应耐压试验”一章中已详细论述。为避免铁磁共振,应采用大于 100Hz 发电机。对于 110kV 级产品的试验,最好用 150Hz 发电机,对 220kV 及以上采用 200Hz 发电机试验为好。

3.1.2 $\cos\varphi$ 的选择

做中小型变压器感应试验时,试验回路大多呈感性电流,因此可以选择低 $\cos\varphi$ (滞后)的发电机,如 0.4 以下。

对大型变压器试验,且频率是 150Hz~200Hz 的,可以选择高的 $\cos\varphi$ 的发电机,比如 0.8 左右。

因为大型变压器的试验一般呈容性电流,补偿后,试验回路的 $\cos\varphi$ 提高了。同时涡流损耗与 f 的平方成正比,磁滞损耗与 f 的一次方成正比。因此损耗就有所增大,提高了 $\cos\varphi$,如 S9-50000/110,用 2 000kVA,200Hz 发电机做感应试验,欠补偿。此时试验回路的 $\cos\varphi$ 为 $\frac{53\text{kW}}{130\text{kVA}}=0.41$ 。

一般来说,运行时的 $\cos\varphi$ 不宜低于发电机铭牌上的额定值,否则转子电流将会增加,使它过热。不过,试验用的中频发电机运行时间短,不会有影响。

当前各厂家,趋于采用低 $\cos\varphi$ (滞后)发电机,这是为了安全保险起见,是可以理解的。

3.1.3 考虑同步发电机的自励磁

中点非全绝缘的变压器的感应高压试验,大多呈容性负载,因而发电机可能产生自励磁现象。为了避免自励磁,发电机的充电容量必须大于容性负载的充电容量。即:

$$P_3 > P_x \quad (\text{E-18})$$

$$P_3 = mU_N^2/x_d \quad (\text{E-19})$$

式中 U_N ——发电机的额定电压;

m ——相数;

x_d ——纵轴的定子绕组的同步电抗。

亦即是: $X > x_d$

(E-20)

式中 X ——试品的容抗

现有试品 SFZ9-50000/11

试品容抗:150Hz 时,5.76A, 21kV, $X=3\ 650\Omega$

200Hz 时,7.68A,21kV, $X=2\ 734\Omega$

从表 E-7 可知,为了避免自励磁,尽可能选择容量稍大的发电机,同时 200Hz 比 150Hz 更容易发生自励磁现象。

3.1.4 发电机容量的选择

根据统计和实践,提出一个经验公式以供参考。

$$P_g = K_f I_0 S \quad (\text{E-21})$$

式中 P_g ——发电机的三相额定容量,kVA;

K_f ——与频率有关的系数(见第九章第三节)。

100Hz 时是 2.6,150Hz 时是 1.04,200Hz 时是 4.05。

I_0 ——变压器 50Hz 空载电流百分数,%;

S ——变压器额定容量,kVA。

3.1.4.1 100Hz 发电机的选择

若变压器为 1 600kVA,10kV, I_0 为 1.1%时:

则 $P_g = 0.026 \times 1.1 \times 1\ 600 = 48\text{kVA}$

可以选 60kVA。如果考虑小型产品多台并联试验时,可以选稍大的,如 100kVA 的发电机。

若变压器为 6 300kVA,10kV,35kV 级,低压 d 接, $I_0=0.6\%$ 时:

$$P_g = 0.026 \times 0.6 \times 6\ 300 = 98(\text{kVA})$$

考虑有中间变压器变换电压,还要增大 1.2

表 E-7 不同机组对同一试品的自励磁情况

发电机 /kVA	频率 /Hz	发电机 X_d / Ω	试品容抗 X / Ω	补偿
500	150	3 848	3 650	是
900	150	2 139	3 650	否
250	200	5 513	2 734	是
500	200	3 678	2 734	是
900	200	2 033	2 734	否
2 000	200	919	2 734	否

$$P_g=98 \times 1.2=120 \text{ kVA}$$

按发电机系列中往上靠,选 150kVA 或稍大些,而且要考虑生产的发展。

3.1.4.2 150Hz 发电机的选择

若变压器为 31 500kVA, 110kV 以下, $I_0=1.4\%$ 时:

$$P_g=0.0104 I_0 S=0.0104 \times 1.4 \times 31\,500=459 \text{ (kVA)}$$

考虑有中间变压器变换电压, 增大 1.2, 可选 550kVA, 但应靠近系列取 500kVA 为宜。因为 110kV 级一般都是单相试验, 试验容量小些, 要考虑绕组的改接或机组的振动因数。

若变压器为 63 500kVA, 110kV 以下, $I_0=0.9\%$ 时:

$$P_g=0.0104 I_0 S=0.0104 \times 0.9 \times 63\,000=590 \text{ (kVA)}$$

考虑中间变压器因数 1.2, 则可选 750kVA, 考虑发展, 可选稍大些, 如 900kVA。

3.1.4.3 200Hz 发电机的选择

若变压器为 120 000kVA, 220kV 级以下, $I_0=0.6\%$ 时:

$$P_g=0.0405 I_0 S=0.0405 \times 0.6 \times 120\,000=2\,916 \text{ (kVA)}$$

需要指出, 当变压器绕组是一般结构时, 则选 2 000kVA 机组也可以。如绕组排列是: HV-LV-HV, 由于电容大, 则选 3 000kVA 为好。

若变压器为 360 000kVA, 电压 330kV、500kV, $I_0=0.25\%$ 时:

$$P_g=0.0405 I_0 S=0.0405 \times 0.25 \times 360\,000=3\,645 \text{ (kVA)}$$

考虑中间变压器因数, 乘 1.2, 为 4 374kVA, 变压器绕组一般排列都是 LV-HV-LV-HV, 电容量很大, 因此要再乘 1.3, 为 5 686kVA, 若用电缆引线, 电容更大, 要再乘 1.2, 为 6 823kVA。考虑发展, 最好选 7 500kVA 发电机为好。

实践证明, 以上所选的容量是合适的。

3.2 原动机

3.2.1 异步电动机

对中小型发电机组来说, 有的选异步电动机来作原动机, 因为异步机结构最简单, 坚固耐用, 也较便宜。但它从电网吸取落后的电流, 降低电网的 $\cos\varphi$, 这是它的缺点。同时, 随着负载的增加, 转速略有降低, 转差约为 1.5%~5.0%。但是, 若选择稍大的千瓦电动机, 问题就不大了。对小型产品试验, 频率 f 在规定裕度以内的, 采用异步电动机是可行的。

3.2.2 同步电动机

对大中型以上发电机组来说, 采用同步电动机作原动机是最理想的。

3.2.3 电动机功率的选择

选择的方法同前面工频发电机组的算法一样, 一般定型机组都有很好的配套, 不单独提出要求。现列表供参考。见表 E-8。

从表 E-8 可知, 电动机的功率是发电机容量的 $1/3 \sim 1/2$ 。所以过载能力是较大的。做感应试验时, 经常会有短路或击穿的现象, 所以要求电动机必须保持稳定, 具有一定抗干扰能力。

4 有关问题

两种发电机组除了上述各自的特点之外, 还有其共同性。

(1) 电压波形畸变率不应超过 3%。特别是工频同步发电机的电压波形必须是标准的正弦波, 这是涉及到变压器性能试验的准确度的关键问题。

(2) 发电机的定子绕组必须接成 Y 接。因为 Y 接时线电势不存在三次谐波。若接成 d 接, 线端虽无三次谐波电压, 但回路中的三次谐波电流将引起附加损耗。同时电压波形很难保证。

表 E-8 发电机与电动机的配套

发 电 机	Hz	150	200	200	150	150	150	200	200	200
	kVA	100	250	350	450	500	900	2 000	3 000	7 500
	kV	0.8	0.8	0.8	3.15	3.15	6.3	3.3	6.3	6.6
	cosφ	0.3(后)	0.3(后)	0.3(后)	0.3(后)	0.2(后)	0.2(后)	0.8	0.2(后)	0.7
电 动 机	Hz	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	kW	45	110	160	160	200	250	1 050	1 000	3 050
	kV	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	6	10	6
	cosφ					0.9(前)	0.9(前)		1	0.8
	种类	异步	异步	异步	异步	同步	同步	异步	同步	同步

(3)大、中型发电机应允许单相运行。即三相绕组串联或一相开路,定子电流不低于三相电流的70%。特别是做感应试验,很多采用单相电源,因此要求发电机的定子绕组起末端都引出来,以便改接。

单相运行引起电机发热问题和基础共振问题,电机厂必须保证妥善解决。

(4)操作要求:

①确保最低励磁时发电机起始电压尽量不高于额定电压的10%。

②无级调压,能均匀缓慢稳定升压。

③远方调压。

(5)能满负载下切断。

例如做温升试验及高压试验放电等都是不降励磁迅速切断的。保证机组不损坏。

(6)采用励磁设备,如 KTLG-B 同步发电机励磁装置,代替励磁机。

该励磁柜由整流变压器、三相全控桥、晶闸管变压器、专用 JLK-F 集成励磁控制器、控制保护电路等组成,显示仪表、按钮、信号灯等均安装在门板上。调节励磁设备输出电压,可改变同步发电机的输出电压,其电压调节变化范围为10%~110%额定电压。工作稳定可靠实现恒流励磁。

(7)大、中型发电机在启动时为了减少轴承的摩擦力矩,在轴承上应采用高压油顶装置。

(8)电动机应允许降压起动。

由于电源容量限制,可以降压起动,定子绕组从 Y 接成 d 的起动,借助电抗器或自耦变压器起动以及两段起动。

(9)采用励磁设备,如 BLZK-B 同步电动机励磁装置。提供直流励磁电源。对同步电动机起动,投励、励磁自动调节,并对停机灭磁、失步保护等进行有效控制。

附录 F 采用频响法对变压器绕组变形故障的测量分析与判断

1 概述

电力变压器因外部短路造成变压器绕组的变形位移或匝间短路,是变压器运行过程中的常见故障。不论怎样提高电力变压器动稳定性能,在运行过程中,当变压器经历了外部短路事故后,以迅速快捷的方式分析变压器绕组是否存在变形、位移或匝间短路,仍然是保障变压器运行安全的必然要求。

经过 10 年探索,采用频响法(频响分析法,英文简称 FRA)测试变压器绕组的变形位移已为我国电力部门广泛接受。但是,究竟如何采用频响法对变压器绕组的变形程度进行分析,尚无统一的定量分析标准。频响法与低压脉冲法、阻抗测量法相比,在测量电力变压器绕组的变形故障过程中,具有灵敏度高,试验设备轻便,判断直观的优点。但是,频响法在试验过程中也受到诸多因素的影响,这就要求试验人员在试验线路的连接中使不利于分析判断的因素得到充分的抑制,对于试验结果的分析,能够从变压器绕组结构的特点上进行判断,并由此确定变形(损伤)的程度。本附录根据现场测量的实际经验,就测量方法的一般要求和分析判断的主要原则提出了一些建议。

2 频响法的原理和基本技术参数要求

目前,在频响测量中,采用的信号幅度一般为 5V~10V,所有试验仪器及附件总质量为 15kg。而在阻抗电压测量中,为了保证测量的准确性,要求输入的电流不低于额定电流的 15%~30%,这就需要较大容量的试验电源。在采用低压脉冲法的测量试验中,实际施加的试验电压一般高达 90V~450V,试验设备庞大而且脉冲试验波形的重复性差,难以控制。图 F-1 为 FRA 试验接线及变压器绕组的“L—C”分布参数示意图。

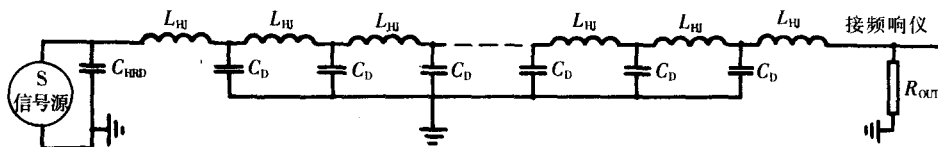


图 F-1 FRA 试验接线及变压器绕组的“L—C”分布参数示意图

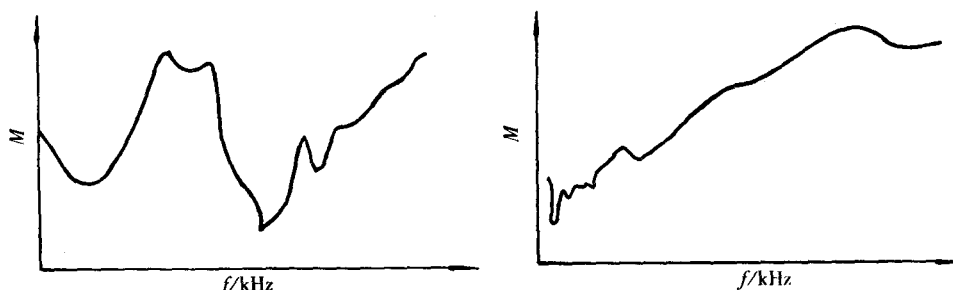
S—信号源 C_{1BD} —绕组端口电容 C_D —对地电容 L_{HU} —匝间电感 R_{OUT} —匹配电阻

如图 F-1 所示,在小信号响应的频响法中,当变压器绕组的电阻与测试回路的匹配电阻相比可以忽略不计时($r \ll R$),电力变压器绕组可以看作“纯粹的 L—C” Π 型网络。换句话说,频响法对于分析大容量的变压器准确性更高一些。

在正确匹配信号的输入和输出电阻的情况下,由这样的 L—C 网络的一端注入一定的电压激励,在绕组网络的另一端就可以得到对应的响应,如果将激励电压的输出和输入的量值比作为对应电压频率的函数,并逐点描绘,就得到了该网络的响应频谱,如图 F-2 所示。

$$M_i(f) = \frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)} \quad (F-1)$$

试验证明,在选定的频率范围内和试验数值的测量精度范围内,响应幅度比值的变化在 0.000 1~1.3 之间,为便于进行量值对比分析,上式通常以对数的形式表示为:



(a) 低压绕组图谱

(b) 高压绕组图谱

图 F-2 典型的变压器低压绕组和高压绕组的响应频谱

$$\lg[M_i(f)] = K \lg \left[\frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)} \right] = 20 \lg \left[\frac{V_{out}(f)}{V_{in}(f)} \right] \quad (F-2)$$

其中 K 为对数函数的加权系数。加权系数 K 的取值大小, 决定于显示和分析图谱变化的最小分辨率的要求。根据现场实际测量的结果, 在小信号频域的测试分析中, 当响应幅度的分辨率优于 $1/10\,000$ 时, 加权系数 $K=20$ 即可以满足全频域分析的需要, 即响应频谱可以精确描述 -80dB 的测量值。

为了便于测量分析, 除了对响应函数表示方式的约定外, 对测量频率的分辨率和测量频域范围也有相应的规定和要求。在测量频域范围的确定中, 考虑到工频仅为 50Hz , 如果高端频率设定为 500kHz , 则高于工频约 $10\,000$ 倍, 对应的电抗(容抗)和响应的变化可以满足响应频谱的分析要求。

因此, 对频响法测量仪表系统技术参数的要求为:

测量频率范围: $0 \sim 500(1\,000)\text{kHz}$;

标称测量频率的偏移应小于 0.2% ;

测量幅度的分辨率优于 0.2% 。

从最初对频响法的试验研究过程来看, 上述技术指标的约定是适当的。

变压器绕组的频谱响应峰值对应的绕组各段对地电位分布是非线性的, 如图 F-3 所示。这一试验分析表明: 在不同的频率下, 各绕组的信号耦合(如图 F-4 所示)也是非线性的, 因此采用过高的测量频率, 除了试验回路中的信号能量散失较大外, 对于绕组变形的定量分析也无益处。

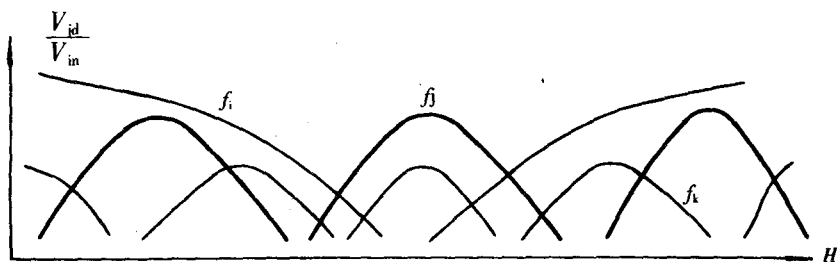


图 F-3 FRA 试验中不同频率下变压器绕组各节点对地电位示意图 ($f_1 < f_2 < f_3$)

V_{in} —输入电压 V_{id} —沿线高度各节点对地电位 H —绕组高度

根据积累的现场实测经验数据, 现在看来, 现有的测试仪器和分析方法仍然略显繁琐, 还可以进一步简化。如果在测量频域的选择上使测量信号的旁路分量降至最小(如图 F-5 所示), 数据采

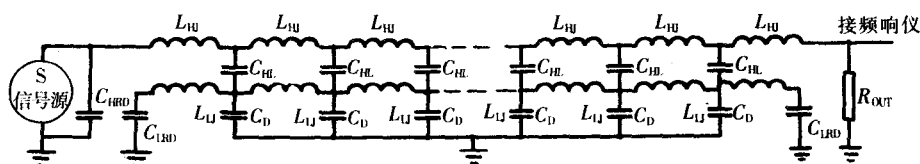


图 F-4 高频下被试绕组与相邻绕组信号耦合示意图(I)

S—信号源 C_{1RD} 、 C_{1DB} —绕组端口电容 C_{1U} —绕组之间的耦合电容 C_D —对地电容 L_{1U} 、 L_{1D} —匝间电感 R_{OUT} —匹配电阻

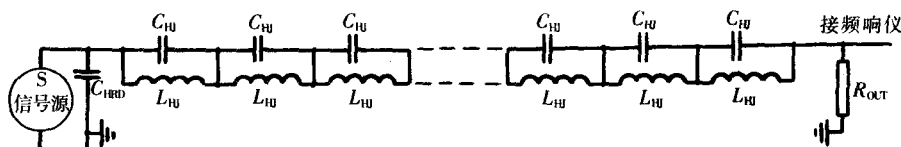


图 F-5 高频下被试绕组与相邻绕组信号耦合示意图(II)

S—信号源 C_{1RD} —绕组端口电容 C_{1U} —匝间电容 L_{1U} —匝间电感 R_{OUT} —匹配电阻

样精度足可以使绕组变形测量的判据具有唯一性。但是采用高于工频的单一频率(如 1 000Hz)电源测量感抗的变化,对于不同容量和不同型号变压器的试验结果是不具有可比性的。这是因为:一些变压器绕组的变形,虽然感抗变化微小,但是变形已经影响到变压器的安全运行。例如:在一例频谱测量中,频率响应-40dB 时,响应幅度变化 $\Delta M = -2\text{dB}$ 。

如进行归一化条件下的感抗变量计算,即:

$$\begin{aligned} M = -40\text{dB 时} \quad V_{\pi} &= 0.01 & \text{则 } V_{\pi} &= (1 - 0.01^2)^{1/2} = 0.999\ 95 \\ M = -42\text{dB 时} \quad V_{\pi}' &= 0.007\ 943 & \text{则 } V_{\pi}' &= (1 - 0.007\ 943^2)^{1/2} = 0.999\ 97 \\ \Delta V_{\pi} &= V_{\pi}' - V_{\pi} = 2.0 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

在这一计算中,并没有考虑测量过程中信号旁路的情况,但是检查发现绕组变形已经严重危及运行安全。而在上述计算中:绕组的感抗变化十分微小。这也说明:频响法的检测灵敏度很高,而且故障判断的准确性可以不取决于感抗变化。

3 响应频谱分析和绕组变形分析的一般特征

在 $L-C$ 网络中,对应于网络节点的电感和电容,其感抗和容抗为:

$$Z_L = \omega L; \quad Z_C = \frac{1}{\omega C_j}; \quad Z_{Cg} = \frac{1}{\omega C_g}$$

由于被测的绕组与测量取样(匹配)电阻相串联,在响应频谱中,为便于区分和判断,将响应频谱中随频率增大而幅度降低的区域称之为“电抗作用区”;而将响应频谱中随频率增大而幅度随之增大的区域称之为“容抗作用区”。虽然实际上在整个测试频域内,除了在起始的低频段内的测试系统为感性的外,其余绝大部分都是呈容性的。

为了分析响应频谱中的峰值的偏移情况,同时也是为了便于比较不同的绕组在频域中的变化,我们将“对应的”进行比较的频谱中的最低频率作为“归一化频率”的基准。只要将其他的峰值频率与其相除,就可以判断其他“峰值频率”与最低频率下“峰值频率”的偏移程度 P 。由此也可以对被测的绕组的等值电感和电容的变化情况进行粗略的判断。

$$P = \frac{f_{\max-G}}{f_{\max-d}} \quad (\text{F-3})$$

对于已经发生绕组变形或位移的变压器绕组的特征图谱具有以下普遍的特征:

- (1)绕组的特征峰值向高频方向偏移。
- (2)发生绕组内凹变形、扭转移动、线匝移位和匝间短路的响应图谱的幅度增大。
- (3)发生绕组段间垫块脱落,绕组高度降低的响应图谱的幅度降低。
- (4)变形轻微的绕组的响应图谱也会受到相邻损坏严重的绕组影响,图谱产生畸变。

4 影响测量图谱一致性的相关因素及试验接线的一般要求

由于采用高频测试绕组响应图谱,即使绕组有轻微的变化,都会影响测量图谱的一致性。在现场测量中我们发现以下几种情况对测量结果会产生影响。

(1)无励磁开关分装在变压器器身的两侧;开关引线的长短不同;布线方式(工人的操作习惯)和绑扎方式的不同。

(2)因制造过程中的绝缘损伤或缺陷,进行过局部绝缘包扎处理。

(3)因制造过程中或运行过程中发生的绕组匝间故障,所进行的更换线匝(如换位导线更换为普通电磁线);绝缘包扎处理,但是存在残留的原有故障的污染。

(4)浸油的变压器绕组,在吊离油箱后因滴油时间长短的不同,造成绕组响应图谱测量的不一致。当滴油时间足够长,浸在油中的绕组和滴油绕组的响应图谱峰值偏差 P 可以达到约1.25倍。

(5)不同的油温或者测量时的油温处在变化之中,对测量的变压器响应图谱会造成一定的影响。值得注意的是:某些高压为带有载调压开关的变压器(尤其是联络变压器),当测量时油箱内的温度接近运行温度(70°C)时的测量图谱,在 $430\text{kHz}\sim 470\text{kHz}$ 附近有一峰值,甚至超过 0dB 而到达 3dB ;而当油箱内的温度降低并接近环境温度时,测量图谱峰值移向高频方向,并渐渐平缓。而根据响应峰值频率下的匝间电位分布,在中部调压的分接区域内的电位梯度较高。这一现象很值得变压器设计制造和运行单位认真加以考虑。因为在较高温度下,某些频率成分的电压,在绕组匝间的电位可能达到相当的比率。因此,在分析变压器操作故障中的快速暂态传输过电压(VFTO, Very fast transient over-voltage)时,应当排除这些低频范围内绕组内部电位的异常分布的因素。

具有上述情况在变压器的制造检修和运行中一般也能符合相关出厂标准的要求,但是在变压器绕组的响应图谱的测量分析中,会造成局部频谱在一致性方面的差异。这说明:频响法不宜作为变压器制作工艺是否完善的评定标准。因此要求测试人员对变压器的结构状况和以往的处置情况有充分的了解,在图谱分析中能够加以区分和判断。

由于频谱测量的灵敏度较高,测量引线的长短和布置方式也会对测量结果造成影响,在频响分析试验中,试验的接线是影响试验分析结果的关键所在。因此有必要对测试引线的布置方式和测试信号的注入和采样方式进行约定。

对于测量信号引线的布置方式,一般要求信号线与油箱的距离大于被试绕组电气连接线间的最小油中距离,通常为不小于 10cm 。测量信号电缆在测量过程中不宜盘绕。应将其完全放开,使测量引线的“电感”与绕组相比可以忽略不计。

由于绕组的变形以端部的几率为大,因此对于绕组以星形方式联结中性点引出的接线,应从中性点注入信号,由绕组的线端接取样信号。对于绕组以星形方式联结,但是没有中性点引出的试验接线,由绕组的首端注入信号,将其余两相绕组首端短接并接取样信号端。

对于以角形联结的绕组,则应由绕组的首端注入信号,该相绕组的末端接取样信号端。

对于频谱异常的测试结果,可以考虑颠倒信号注入端和取样信号端的顺序,重新测量以便判断故障的大致部位。因为当故障部位靠近绕组的某一端时,两次测量的结果会有区别;而当绕组没有故障时,两次测量结果的一致性就很好。

5 关于频谱测量的数值分析和绕组变形的临界判据

为了更深入地了解频响法在变压器绕组变形分析中的特点,在必要对采用阻抗电压测量法和低压脉冲法判断变压器绕组丧失动稳定性能的分析判据有所了解。

采用阻抗电压测量法判断变压器绕组丧失动稳定性能的分析判据为:

短路电抗变化率小于 2.0% ($\Delta U_{sk} \leq 2.0\%$)

由于阻抗电压的测量本身反映的就是变压器三相绕组的平均电抗,随着检测技术的提高和完善,以短路电抗变化度小于 2.0% ($\Delta U_{sk} \leq 2.0\%$) 这一统计平均的方法来确定单个绕组的局部变形的判断方法显得越来越粗糙。事实上,无论是俄罗斯还是我国的有关试验部门都发现:有相当一部分变压器在经历短路试验后,虽然短路电抗变化率小于 2.0%,但是变压器绕组的动稳定性能已经丧失,不能承受再次短路冲击。

低压脉冲法判断变压器绕组丧失动稳定性能的分析判断据为:

脉冲宽度 1.0 μ s(半峰值),响应幅度变化 2.0% ($\Delta M_{max} \leq 2.0\%$)

以低压脉冲峰值的幅度变化来判断变压器绕组的变形,事实上就是以特征频率为主的复合频率响应的幅度变化判断绕组变形与否。但是,对于容量不同的变压器绕组,含有多种频率成分的低压脉冲中,每个频率成分的电压在绕组中的过渡过程是不同的,因此以脉冲峰值幅度的变化来判断绕组损坏与否,也只具有统计上的意义。

频响法判断变压器绕组丧失动稳定性能的分析判据,是依据频率响应图谱确定的变压器绕组的特征指纹,通过图谱的幅度变化,响应峰值对应频率的偏移,判断变压器绕组的变形与否。但是由于在不同频率下,绕组内部电位分布呈非线性,要形成统一的判断标准是十分困难的。特别是变压器绕组变形后,并非所有的变压器都不能继续运行。因此,需要确定一个临界判据,即:通过图谱变化,确定变压器绕组变形后能否继续运行的界限。所谓临界判据是指变压器绕组存在变形但是仍然可投入运行,并能够承受再次短路的冲击继续运行的频谱响应的量化指标。

通过现场测量和吊检,所确定的临界判据就是在特定的频率响应范围内,通过几个特定频点下的响应幅度的变化以及响应曲线的曲挠程度变化来确定的。在经过归一化计算分析后,对应的判据对单个变压器绕组即具有唯一性。

临界判据对变压器绕组变形状况的描述是一个阈值,在此范围内,变压器绕组存在微小的变形,但是需要进行绝缘试验,保证变压器可以安全运行。如果超出阈值,可以判定:即使绕组绝缘良好,绕组在下一次短路冲击中可能损坏。这一量化指标满足各种电压等级不同容量规格的变压器的要求,不受测量人员因素的影响,不受测量环境和温度的影响,具有直观可读和重复性好的优点。

采用频谱测量分析变压器绕组是否变形,严格地说不能称之为测量变形,因为频谱测量的结果给出的仅仅是频谱响应的特征,而不是变形的具体尺寸。频响分析中采用的是对数值,而对数的差值+2dB或-2dB,对于不同的参照基准量具有不同的意义。在归一化测量分析中,如果参照的基准量为-20dB($M=0.1$),差值为+2dB或-2dB时,对应的量值比分别为 1.258 93 和 0.794 33,即为 0.1 的 1.258 93 和 0.794 33 倍;如果参照基准量为-40dB($M=0.01$),且差值仍为+2dB或-2dB,量值的变化则为 0.01 的 1.258 93 和 0.794 33 倍。所以频谱响应测量中的量值变差定量分析,应考虑参照基准量的量值、测量仪器的分辨率和测量量值的置信度。

6 频响法的缺陷与不足以及在线测量相关技术展望

(1)现有的关于变压器绕组变形的频响法,是以绕组的响应为“指纹”,判断绕组图谱有无变化。虽然测量灵敏度高,但是测量分析工作量大,测量时间约需 1h~2h。要求测试人员具有广泛的变

压器结构和图谱分析经验。

(2)现有的关于变压器绕组变形的频响法,是在离线方式下进行的。而目前一些文章报道的在线测量技术,电抗分辨率仅为10%,这是不符合要求的;无论变压器短路等值电抗测算值还是变压器绕组本征电抗的测算值的分辨率都不应低于0.2%。

(3)采用超声成象方式判断变压器绕组变形,试验室分析精度可以在3mm。但是这一方法在有油和无油状态下的结果差异过大,试验结果受温度影响。因此用于对绕组本体变形的测量意义不大。但是,对于频响分析难以解决的绕组引线支架变形移位具有一定的作用。

7 频响法应用实例

频响法主要看测量波形图有无变化,短路后不变化的极少。一般情况是改变接线后即有变化,可称为基本的变化,判断为可继续使用,这要由经验判断。多数绕组在短路发生后波形发生了变化,下面列举了一些例子。绕组典型图谱见图F-6~图F-8。

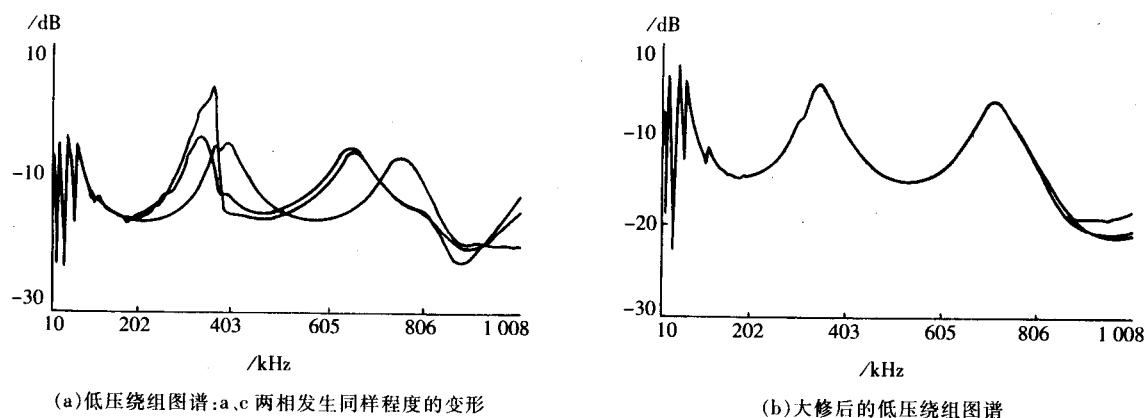


图 F-6 例 1 中典型图谱

【例 1】绕组典型图谱,见图 F-6。

例 1 中某变电站 1 号主变,其型号:SFPSZ7-150000kVA,电压:220kV/110kV/10kV,状态:10kV 侧经历过 3 次短路冲击,常规电气试验结果正常,吊罩也没有发现任何异常。特征:高、中压绕组基本正常,低压绕组的 a、c 相严重变形,均表现为绕组线匝扭曲并向内收缩,且变形程度极为相似。

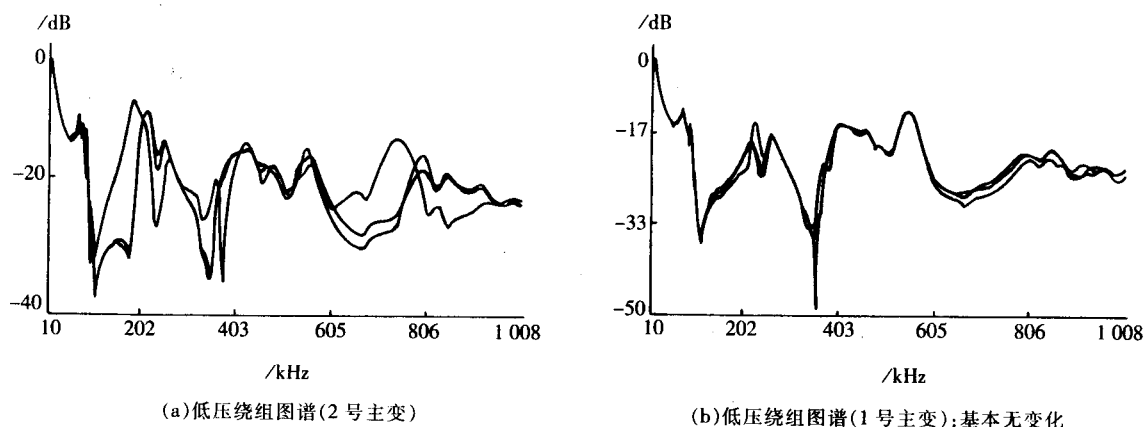
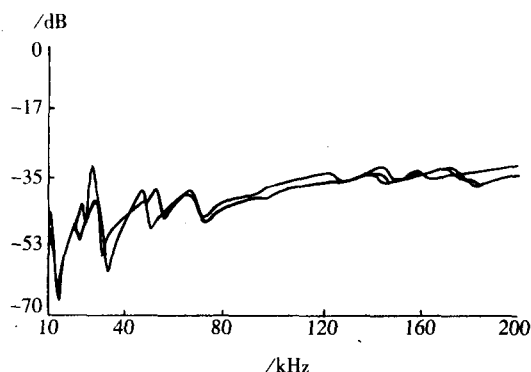


图 F-7 例 2 中典型图谱

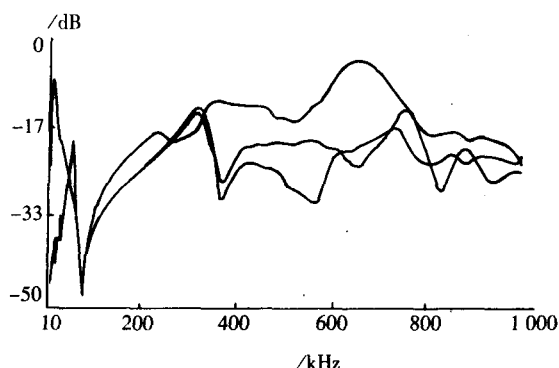
【例2】绕组典型图谱,见图 F-7。

例2中某变电站2号主变,其型号:SF7-63000kVA,电压:110kV/10kV,状态:10kV侧经历过2次短路冲击(带地刀合闸),常规电气试验结果正常。特征:高、低压均发生变形。高压绕组A相的围屏爆裂,部分线匝呈波浪状扭曲。低压绕组a相中部线匝散乱,且呈典型的鼓包状变形。

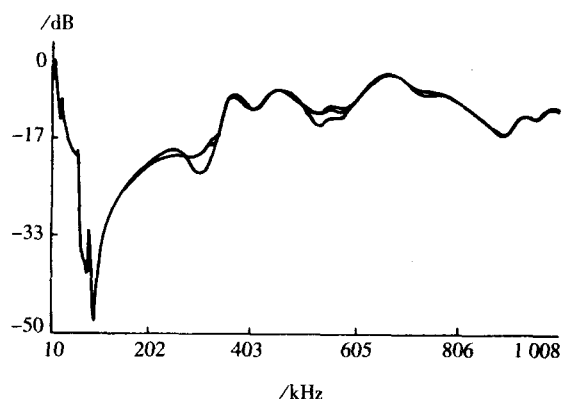
【例3】绕组典型图谱,见图 F-8。



(a) 高压绕组图谱:在低频段 B 相曲线的谐振频点与 A、C 两相的不同



(b) 低压绕组图谱:在低频段 c 相曲线的谐振频点与 a、b 两相的明显不同



(c) 修后低压绕组图谱:基本正常

图 F-8 例3中典型图谱

例3中某变电站1号主变,其型号:SF9-31500kVA,电压:110kV/10kV,状态:10kV 馈线遭受雷击跳闸,变压器轻重瓦斯差动保护动作,发生匝间短路故障。特征:高、低压绕组均发生明显变形,其中,高压 B 相以及低压 c 相绕组变形较严重(图 F-8a、图 F-8b)。更换损坏的绕组后,低压绕组图谱正常(图 F-8c)。